

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Інженерно-фізичний факультет  
Кафедра фізики металів**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Є.В. Іващенко

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра  
зі спеціальності 132 Матеріалознавство  
на тему: «Структурно-фазовий стан та механічні властивості  
поверхневих шарів латуні ЛС59-1 після високочастотного ударного  
оброблення за криогенних температур»**

Виконав:

студент II курсу, групи ФМ-81мп

Угрин Кирило Олегович \_\_\_\_\_

Керівник:

Ст. викладач, к.т.н.

Бурмак А.П. \_\_\_\_\_

Консультант з розроблення стартап-проекту:

Викладач, к.е.н., доцент

Петренко К.В. \_\_\_\_\_

Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях:

Д.т.н., професор

Левченко О.Г. \_\_\_\_\_

Консультант з нормоконтролю:

Асистент

Шаповалова Н.А. \_\_\_\_\_

Рецензент:

к.т.н., доцент

Биба Є.Г. \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.  
Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Інженерно-фізичний факультет**  
**Кафедра фізики металів**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 132 Матеріалознавство («Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Є.В. Іващенко

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
**Угрина Кирилу Олеговичу**

1. Тема дисертації **«Структурно-фазовий стан та механічні властивості поверхневих шарів латуні ЛС59-1 після високочастотного ударного оброблення за кріогенних температур»**, науковий керівник дисертації Бурмак Андрій Петрович, к.т.н., затверджені наказом по університету від «12» листопада 2019 р. № 3890-с

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження: латунь ЛС59-1

4. Вихідні дані: літературні дані та результати особистих експериментів

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Дослідити мікроструктуру, мікротвердість та морфологію поверхні латуні ЛС59-1 після ультразвукової ударної обробки за кріогенних температур. 2. Зробити висновки згідно отриманим експериментальним даним.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: фотографії мікроструктури та морфології поверхні, графіки, таблиці.

7. Орієнтовний перелік публікацій: немає

## 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту	Петренко К.В., викладач		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Левченко О.Г., професор		

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Визначення та узгодження теми МД		
2	Аналіз літературних джерел		
3	Розробка методики експериментів		
4	Підготовка першого та другого розділів		
5	Обробка результатів та підготовка третього розділу		
6	Підготовка четвертого розділу		
7	Підготовка п'ятого розділу та оформлення МД		
8	Попередній захист		
9	Захист на засіданні ЕК		

Студент

Угрин К.О

Науковий керівник дисертації

Бурмак А.П.

## РЕФЕРАТ

**Магістерська дисертація:** 91 сторінка, 24 рисунка, 21 таблиця, 70 літературних джерел.

**УЛЬТРАЗВУКОВА УДАРНА ОБРОБКА, ДЕФОРМАЦІЯ, ІНТЕНСИВНА ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ, ЗМІЦНЕННЯ, ЛАТУНЬ**

**Об'єкт дослідження** – процеси, що обумовлюють зміцнення поверхневих шарів сплаву латуні ЛС59-1 ультразвуковою ударною обробкою при кріогенних температурах.

**Метою роботи** є дослідження мікроструктури, морфології та мікротвердості поверхневих шарів сплаву латуні ЛС59-1 під дією ультразвукової ударної обробки в середовищі рідкого азоту.

**Методи дослідження** – мікродюрOMETричний, рентгеноструктурний аналіз, скануюча та просвічуюча електронна мікроскопія, мікрорентгеноспектральний аналіз, розрахунок залишкових напружень, метод неперервного вдавлювання індентора.

**Під час виконання** магістерської дисертації були отримані поверхневі шари сплаву латуні ЛС59-1 методом ультразвукової ударної обробки за кріогенних температур (77,4 К). Проведено мікродюрOMETричний, рентгеноструктурний аналіз, скануюча та просвічуюча електронна мікроскопія, мікрорентгеноспектральний аналіз, розрахунок залишкових напружень, метод неперервного вдавлювання індентора для дослідження отриманих поверхонь. В роботі представлені фотоматеріали мікроструктур та графічні представлення про них. Проведена оцінка мікротвердості не лише поверхневих шарів, а й за глибиною модифікованого шару матеріалу.

**Робота є актуальною**, оскільки дослідження структури й механічних властивостей сплаву латуні ЛС59-1 після УЗУО за кріогенних температур раніше не проводились.

## ABSTRACT

**Master thesis:** 91 pages, 24 figures, 21 tables, 70 literary sources.

ULTRASONIC SHOCK TREATMENT, DEFORMATION, INTENSITY  
PLASTIC DEFORMATION, STRENGTHENING, BRASS

**Object of study** – the processes that determine the strengthening of the surface layers of the brass alloy CuZn40Pb1 by ultrasonic shock treatment in liquid nitrogen.

**Objective** – to study the microstructure and microhardness of the surface layers of brass CuZn40Pb1 after ultrasonic shock treatment in liquid nitrogen.

**Methods of the research includes:** microhardness, X-ray diffraction analysis, microscopic analysis, raster electron microscopy, micro X-ray spectral analysis, calculation of residual stresses, method of continuous indenter indentation.

**During the work**, surface layers of brass alloy CuZn40Pb1 were obtained by ultrasonic shock treatment in a liquid nitrogen environment. Microhardness, X-ray and micro-ray diffraction analysis, micro X-ray spectral analysis, calculation of residual stresses, method of continuous indenter indentation was made for the obtained surfaces. Master thesis presents its microstructures and graphic representations. An assessment of microhardness is also produced.

**The work is relevant**, since studies of the surface's alloy CuZn40Pb1 by the method of ultrasonic shock treatment were not previously performed.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	10
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....	11
1.1 Явище ультразвукової ударної обробки (УЗУО) .....	11
1.2 Методи УЗУО .....	13
1.3 Вплив УЗУО на механічні властивості, склад та будову поверхневих шарів .....	16
1.4 УЗУО за кріогенних температур.....	18
1.5 Висновки до розділу 1 .....	22
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ .....	23
2.1 Матеріал дослідження.....	23
2.2 Методика та режими УЗУО .....	24
2.3 Методика досліджень.....	26
2.3.1 МікродюрOMETричний аналіз .....	26
2.3.2 Скануюча електронна мікроскопія (СЕМ) та мікрорентгеноспектральний аналіз .....	28
2.3.3 Електронно-мікроскопічний аналіз структури методом тонких фольг .....	29
2.3.4 Рентгенівські методи дослідження .....	30
2.3.5 Розрахунок залишкових макронапружень методом $\sin^2\psi$ .....	31
2.3.6 Метод неперервного вдавлювання індентора .....	33
2.4 Висновки до розділу 2 .....	35
3 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	36
3.1 Механічні характеристики поверхневих шарів сплаву латуні ЛС59-1 після УЗУО в середовищі рідкого азоту .....	36

3.2 Структурно-фазовий стан поверхневих шарів латуні ЛС59-1 після високочастотного ударного оброблення в рідкому азоті.....	44
3.3 Висновки до розділу 3 .....	53
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	54
4.1 Правові та організаційні основи охорони праці.....	54
4.2 Аналіз наявності шкідливих та небезпечних виробничих факторів.....	55
4.2.1 Мікроклімат .....	55
4.2.2 Повітря робочої зони.....	57
4.2.3 Шум.....	58
4.2.4 Вібрації .....	59
4.2.5 Електробезпека .....	60
4.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці .....	62
4.3.1 Організація робочого місця .....	62
4.3.2 Вентиляція.....	63
4.4 Розрахунок інженерного рішення.....	63
4.4.1 Розрахунок вентиляції .....	63
4.5 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях .....	65
4.5.1 Пожежна безпека .....	65
4.5.2 Безпека в аварійних ситуаціях .....	67
4.6 Висновки до розділу 4 .....	67
5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	68
5.1 Опис ідеї стартап-проекту .....	68
5.2 Розрахунок собівартості проведення дослідження.....	70
5.2.1 Витрати на основні матеріали .....	70
5.2.2 Витрати на спеціальне обладнання .....	71

5.2.3 Основна та додаткова зарплата виконавців досліджень .....	71
5.2.4 Єдиний соціальний внесок .....	73
5.2.5 Витрати на службові відрядження.....	73
5.2.6 Витрати на послуги сторонніх організацій.....	73
5.2.7 Інші прямі невраховані витрати.....	73
5.2.8 Накладні витрати .....	73
5.2.9 Планова кошторисна вартість дослідження .....	73
5.3 Висновки до розділу 5 .....	80
ВИСНОВКИ.....	81
CONCLUSIONS .....	83
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	84



## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

УЗУО – ультразвукова ударна обробка

ІПД – інтенсивна пластична деформація

СЕМ – скануюча електронна мікроскопія

ТЕМ – трансмісійна електронна мікроскопія

ЕДП – енергія дефектів пакування

ОКР – область когерентного розсіювання

ДП – дефект пакування

ТКШ – трансформатор коливальної швидкості

ЗОР – змащуюча охолоджуюча рідина

ДПД – динамічна пластична деформація

НДР – науково-дослідницька робота

## ВСТУП

На сьогоднішній день найважливішим завданням сучасного матеріалознавства є створення конструкційних матеріалів нового покоління з покращеними механічними й функціональними властивостями для роботи їх в умовах силових та температурних полів, впливу агресивних середовищ та рідин, глибокого вакууму, високого тиску [1].

Дослідження впливу ультразвуку на структуру та властивості металів і сплавів показали, що інтенсивні коливання кристалічної ґратки, які відбуваються під дією ультразвуку, супроводжуються значними знакозмінними напруженнями та деформаціями [2]. При цьому починається рух дислокацій та їх взаємодія, що обумовлює збільшення густини дислокацій і концентрації точкових дефектів [3].

На сьогоднішній час все більше розвиваються методи механічного легування з використанням методів інтенсивної пластичної деформації (ІПД). За умов ІПД вирішальна роль у перерозподілі атомів поверхневого шару та в об'ємі матеріалу, процесах фазоутворення і формуванні необхідних фізико-механічних властивостей металевих матеріалів належить процесам аномального масоперенесення за низьких температур [4].

Найефективніші методи модифікації поверхні та формування високоміцних композиційних покриттів є технологія ультразвукового ударного оброблення (УЗУО).

Метою даної роботи є порівняння особливостей хімічного і фазового складу, морфології поверхні та механічних характеристик латуні ЛС59-1 після ультразвукової ударної обробки за кріогенних температур різної тривалості.

## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Явище ультразвукової ударної обробки (УЗУО)

Що потребує великої кількості традиційних і нових конструкційних матеріалів та сучасних технологій покращення їх механічних властивостей? Звичайно, сучасна техніка, потужні машини й механізми, а також унікальні споруди (від звичайних багатоповерхових будівель до атомних електростанцій) [5].

Основні чинники, що обмежують довговічність (або так званий «ресурс») різноманітних технічних виробів, є: корозія, зношування, а також втома металів. Саме тому вчені та інженери усього світу працюють над пошуком шляхів подолання негативних наслідків цих явищ. Зазвичай руйнування починається з робочих поверхонь виробів, які зазнають зовнішніх температурно-силових впливів, а також впливів навколишнього середовища і дії агресивних рідин. На сьогоднішній день існує немало способів зміцнення поверхонь деталей і елементів конструкцій: від нанесення спеціальних покриттів та поверхневого легування, та методів інтенсивної деформації поверхні. Ці методи різноманітні: традиційна дробоструменева обробка, обкатка поверхні кульками або роликami, ударна обробка пневматичними інструментами, тощо. З цією ж самою метою використовують і енергію ультразвукових коливань: потужний ультразвук спричинює суттєві зміни структурного й фазового складу металів і сплавів у твердому стані [5].

Ультразвукова обробка – обробка виробів та готових конструкцій під дією ультразвуку (з частотою 15 кГц – 50 кГц) у технологічних процесах.

Навіть попри високу вартість ультразвукового устаткування, технологія УЗУО знаходить дедалі ширше застосування у світі, зокрема, при обробці зварних швів відповідальних конструкцій і споруд [6].

Це пов'язно з тим, що в даній технології є певні переваги порівняно з традиційними методами поверхневої пластичної деформації і відрзняється вона високою продуктивністю технологічного процесу, зручністю й можливістю здійснення його в умовах спеціалізованих підприємств – при виготовленні зварних конструкцій, а також у процесі їх експлуатації та ремонту на об'єктах [5].

Впровадження УЗУО у промислове виробництво забезпечить можливістю суттєво підвищити надійність і довговічність унікальних та відповідальних споруд, машин і механізмів – таких, як мости й шляхопроводи, рухомий склад залізничного транспорту, гірничо-видобувне обладнання, конструкційні матеріали для суднобудування тощо [5].

Розробка технології УЗУО спрямована на підвищення ресурсу, втомної міцності, корозійно-втомної міцності, зменшення залишкових зварювальних напружень і деформацій корпусних конструкцій. Ультразвукові коливання наразі широко застосовуються для поверхневого зміцнення металів. Останнім часом зростає кількість пристроїв для даного зміцнення та збільшується варіативність такої обробки [7].

Наприклад, пристрій МКП В24В містить послідовно з'єднані ультразвуковий генератор, п'єзокерамічний перетворювач, трансформатор коливальної швидкості (ТКС) і головку у формі стакана з отворами в донній частині, в яких розташовані стрижневі ударні інструменти з конічними потовщеннями на верхніх кінцях, яка утримується на торцевій частині концентратора за допомогою кільцевої пружини, яка входить у відповідну проточку на кінцевій частині концентратора, при чому головка має можливість вільного обертання навколо осі ТКС, а між стрижневими ударними інструментами і торцем ТКС закріплено пластмасовий контейнер, заповнений м'яким пористим матеріалом, який насичено змащуючою і охолоджуючою рідиною (ЗОР). За рахунок капілярного ефекту ЗОР подається в зону обробки і охолоджує інструменти при тривалій обробці [8].

Єдиним недоліком даного пристрою є те, що обертання головки навколо своєї осі при обробці має хаотичний характер, що не дає можливості отримати високу якість поверхні деталі. Цей пристрій не дає отримати контрольовану рівномірну наноструктуру в поверхневому шарі матеріалу. Пластина з високоміцного матеріалу, розташована між торцем і ударними інструментами, поглинає частину кінетичної енергії ударів, що знижує ефективність обробки та механічні властивості деталі, що обробляється [8].

Ще один відомий пристрій для деформаційного зміцнення та наноструктуризації поверхні металів та сплавів. Він являє собою пристрій у якому послідовно з'єднаний перетворювач, концентратор коливань та ємність у вигляді контейнера, в якому розташовані інструменти, що мають форму куль. При цьому ємність жорстко закріплена на торці концентратора, а кулі в ній вільно розташовані на дні. Плaskий зразок щільно закриває контейнер зверху. При включенні ультразвуку увесь контейнер разом із зразком коливаються з ультразвуковою частотою. Кульки починають рухатись у закритому об'ємі з певною швидкістю за рахунок уданої взаємодії із стінкам вібруючої ємності і одна з одною. Траєкторії кульок хаотичні, тому вони здійснюють зіткнення з поверхнею деталі під різними випадковими кутами [8].

Це обумовлює контактно-зсувну схему пластичної деформації, яка сприяє утворенню нанокристалічної структури у поверхневому шарі металів.

Обробка за вказаною схемою призводить до утворення на поверхні деталі зміцненого шару з нерівномірною наноструктурою, і нерівномірність зменшується з ростом тривалості обробки [8].

## **1.2 Методи УЗУО**

Ультразвукові методи обробки базуються на використанні енергії ультразвукових коливань частотою від 18 кГц до 44 кГц з інтенсивністю більше 10 Вт/см<sup>2</sup>. Джерелом ультразвуку служать магнітострикційні і п'єзокерамічні перетворювачі, які збуджуються від ультразвукового генератора [9].

До різновидів ультразвукової обробки належать:

- 1) обробка вільним абразивом, яка використовується для зняття дрібних задирок і шліфування дрібних деталей;
- 2) розмірна обробка деталей з твердих крихких матеріалів за допомогою абразивної суспензії;
- 3) чищення і змащування робочої поверхні абразивного круга під час чистового шліфування;
- 4) надання примусових ультразвукових коливань малої амплітуди лезовим і абразивним різальними інструментам для інтенсифікації різання матеріалів, які погано піддаються обробці;
- 5) надання примусових ультразвукових коливань інструментам для пластичного деформування при виконанні поверхнево-зміцнювальної обробки.

Якщо ж говорити про методи ультразвукової ударної обробки (УЗУО), то вони належать до методів інтенсивної пластичної деформації під дією механічних контактних впливів проміжними ударними елементами з високою частотою  $\sim (1 - 2)$  кГц, джерелом яких є ультразвукові коливання частотою близько 20 кГц [10, 11].

Загалом методи УЗУО застосовуються для покращення комплексу властивостей зварних з'єднань та зміцнення частин конструкцій, що відіграють роль концентраторів напружень. Відомо, що дослідження впливу ультразвуку великої інтенсивності розпочалося ще в 70-х роках минулого століття [10]. Популярність цієї обробки пояснюється багатократним ударним навантаженням поверхні оброблюваної деталі, внаслідок чого і відбуваються процеси інтенсивного деформування та наклепу, що в свою чергу викликають суттєве зміцнення матеріалу та перебіг в поверхневих його шарах різноманітних фізичних явищ, наприклад, істотного підвищення рухливості атомів, тобто процесів аномального масопереносу [10, 11].

Переваги методу УЗУО [10]:

- 1) висока швидкість, легкість застосування;
- 2) можливість обробки конструкцій у важкодоступних місцях і деталей складної форми;
- 3) можливість значного подрібнення зерен, що можна використати при створенні деталей із високим рівнем поверхневого або об'ємного наклепу.

В основі відомих способів ультразвукової ударної обробки зазвичай використовують ультразвуковий вібраційний інструмент, рухомі ударні елементи високої міцності якого нормовано притискаються до оброблюваної поверхні. Інтенсивність коливань ударних елементів забезпечують за допомогою ультразвукового перетворювача коливальної швидкості, з вихідним торцем якого контактують ударні елементи високої міцності.

Способи ультразвукової ударної обробки поділяють на два напрямки їх застосування: способи, які спрямовані на зміцнення поверхні та способи, які призначаються для того, щоб зняти залишкові напруження у зварних з'єднаннях.

До першої групи відносять такі способи:

Спосіб ультразвукової ударної обробки, за якої робочу поверхню інструменту притискають до оброблюваної поверхні і надають переміщення їм один відносно одного.

Спосіб ультразвукової ударної обробки та пристрій, який в свою чергу складається з послідовно з'єднаних перетворювача, ультразвукового концентратора з оправкою на його торці, магнітом навколо оправки і сталевими кулями, що розташовуються в один шар між дном оправки і поверхнею деталі. Ультразвукові коливання викликають примусові коливання куль в невеликому зазорі, які в свою чергу через ударну взаємодію деформують та зміцнюють поверхню виробу. Деформуючим елементам надається обертовий рух, за участю магніту, що створює відповідне магнітне поле. Виникає контакт-зсувна схема пластичної деформації, що дозволяє якісніше обробити металеві поверхні.

Також спосіб ультразвукової ударної обробки поверхні виробів, за якого ультразвуковий перетворювач, що зв'язаний з робочими інструментами, притискають нормовано до поверхні виробу і надають їм переміщення один відносно одного [12].

До другої групи відносять такі способи:

Спосіб ультразвукової ударної обробки, за якого обробку здійснюють, використовуючи ультразвуковий вібраційний інструмент, рухомий ударний елемент якого притискають до поверхні виробу, що обробляють, а необхідну інтенсивність коливань ударного елемента надають за допомогою ультразвукового перетворювача, з вихідним торцем якого контактують ударні елементи. При цьому використовуються згинальні коливання ударного елемента ультразвукового інструменту [12].

Спосіб обробки зварних металоконструкцій (зазвичай зі сталі), який має в собі обробку ультразвуковим ударним інструментом зони металоконструкції, що прилягає до зварного шва, створення нормованих за величиною і характером розподілу залишкових напружень стиснення в навколо шовній зоні, а обробка здійснюється з амплітудою зміщення вихідного торця перетворювача [12].

Також спосіб ультразвукової ударної обробки зварних з'єднань, за якого обробка проводиться, використовуючи ультразвуковий вібраційний інструмент, рухомі ударні елементи якого нормовано притискають до оброблюваної поверхні, інструмент переміщують відносно оброблюваної поверхні, а необхідна інтенсивність коливань ударних елементів забезпечується за допомогою ультразвукового трансформатора коливальної швидкості, з вихідним торцем якого контактують ударні елементи [12].

### **1.3 Вплив УЗУО на механічні властивості, склад та будову поверхневих шарів**

Ультразвукова ударна обробка (УЗУО) є одним з найбільш ефективних методів модифікації поверхні [12, 13]. Вона може стати досить ефективною та простою альтернативою МФП, що потребує застосування



інденторів спеціальної форми. На сьогоднішній час УЗУО відпрацьоване тільки для умов обробки на повітрі за кімнатної температури [14]. Саме українські вчені займають провідні позиції у цьому напрямі як при розробці обладнання [15], так і проведенні фундаментальних досліджень [16]. Серед іноземних вчених слід виділити роботи С. А. Rodopoulos із колегами [17, 18].

Незважаючи на ці фактори, сьогодні така обробка використовується в основному для пониження залишкових напружень у зварних з'єднаннях, що в свою чергу сприяє підвищенню їхньої втомної міцності [19]. В першу чергу це пов'язано зі значним впливом процесів оксидування [20].

Завдяки методу УЗУО можна отримувати вироби з підвищеним запасом міцності (до декількох разів), так як відбувається оптимальний розподіл внутрішніх напружень в ньому. Це явище використовується для збільшення ресурсу деталей (до 10 разів) високої відповідальності, які працюють в умовах високих та знакозмінних навантажень [10, 11]. Це підтверджено в роботі [10], УЗУО приводить до інтенсивної деформації поверхневих шарів матеріалу, значного подрібнення зеренної структури та перерозподілу внутрішніх напружень матеріалу.

В роботі [21] досліджено вплив ультразвукової обробки на структуру та властивості поверхневого шару титану BT1-0 в субмікрокристалічному стані. Показано, що об'єднуючи методи об'ємної (гвинтової екструзії) й поверхневої (УЗУО) інтенсивної пластичної деформації, можна забезпечити підвищену міцність, зносостійкість й корозійну стійкість поверхневих шарів титанових сплавів.

Основні результати досліджень [21, 8]:

- 1) після гвинтової екструзії в титані BT1-0 формується структура з розміром зерен порядку 200 нм – 250 нм;
- 2) встановлено, що змінюється хімічний стан поверхні титану BT1-0 після УЗУО в середовищі рідкого азоту та аргону;
- 3) УЗУО в середовищі аргону приводить до насичення поверхневих

шарів киснем (до 40 ат.%);

4) УЗУО в середовищі рідкого азоту приводить до насичення поверхневих шарів атомами нітрогену (до 21 ат.%);

5) після УЗУО в середовищі рідкого азоту мікротвердість сплаву титану зростає в 3,5 рази;

6) після УЗУО в середовищі аргону мікротвердість сплаву титану зростає в 3 рази.

Зміцнення поверхні металевих виробів та зварних швів суттєво підвищує їх якість і довговічність. На сьогодні велику популярність отримали методи обробки поверхні матеріалів за допомогою пластичної деформації. Підвищився інтерес до високоенергетичних видів оброблення поверхневих шарів, до яких в свою чергу відноситься зміцнення за допомогою ультразвукових коливань [8].

Результати досліджень [21, 8] показали, що УЗУО в інертному середовищі модифікує дислокаційну структуру та значно подрібнює зерна в поверхневих шарах. Відбувається навіть так звана наноструктуризація, а також інтенсифікація дифузійних процесів. Ці чинники дозволяють підвищити мікротвердість матеріалу до 2,5 разів та покращити його зносостійкість.

#### **1.4 УЗУО за кріогенних температур**

Суттєвим недоліком відомих способів ультразвукової ударної обробки поверхонь є локальне підвищення температури в місці контакту ультразвукового ударника з поверхнею матеріалу, викликана дисипацією механічної енергії [12].

Тому для вирішення цього недоліку використовується УЗУО за кріогенних температур.

УЗУО за кріогенних температур не супроводжується динамічним поверненням або рекристалізацією, що дозволяє більш ефективно подрібнити зеренну структуру. Іншою перевагою кріодеформації є істотне підвищення

міцності при менших деформаційних зусиллях по відношенню до традиційних методів ІПД. Крім того, як показали попередні дослідження, проведення наступного відпалу дозволяє отримати оптимальне співвідношення рівня міцності та пластичності [13].

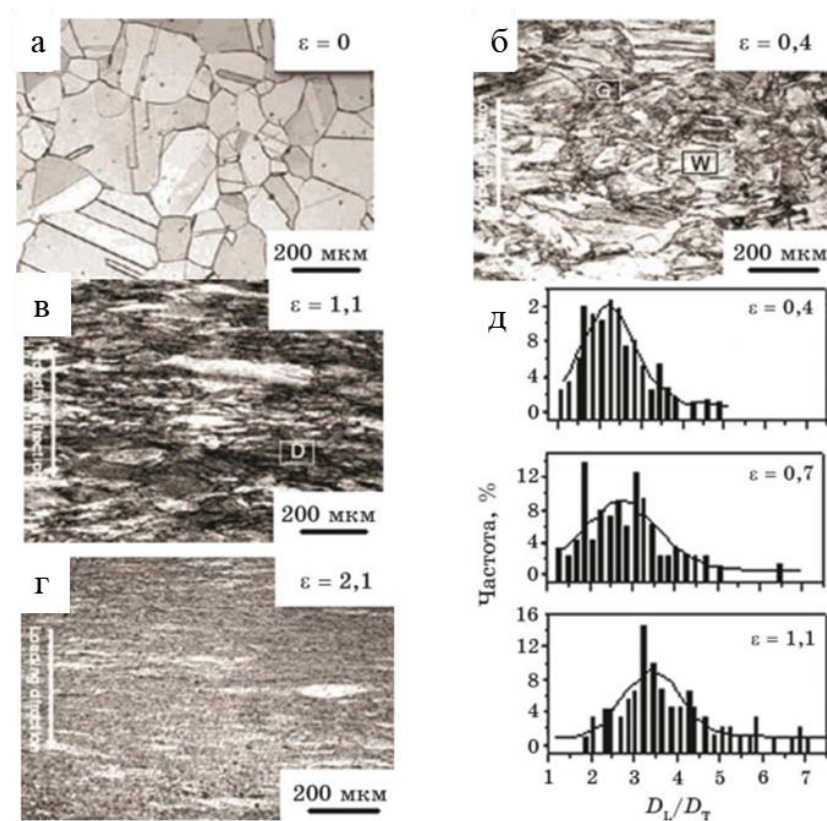
Однак, для практичної реалізації технології кріодеформації потрібно знати характер зміни структури й механічних властивостей при нагріванні кріодеформованого металу до кімнатної або ж більш високих температур. Очевидно, що характер мікроструктур або текстури, які формуються в металах при різних умовах кріодеформації й відпалу буде визначатись діючими в них відомими деформаційними модами, так як системами дислокаційного ковзання й двійникування. В цьому випадку великий інтерес представляє дослідження структурних станів й механічних властивостей металів і сплавів з різною енергією дефектів пакування, підданих ІПД при температурі рідкого азоту й відігрітих до кімнатної температури та вище.

В роботах [22–23] виконано детальне дослідження еволюції мікроструктури в попередньо відпаленої міді при динамічному кріостисканні з високою швидкістю деформації. Вихідний розмір зерен знаходився в межах 100 мкм – 250 мкм. Швидкість деформації при кожному ударі сягала  $1 \times 10^2 \text{ с}^{-1}$  –  $2 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Перед кожним ударом зразки витримувались в рідкому азоті. Температура зразків при деформації не перевищувала  $-100^\circ\text{C}$ .

В результаті ІПД вихідні рівновісні крупні зерна стають плоскими і розташовуються перпендикулярно напрямку навантаження (рис. 1.1). На рис. 1.1, д видно, що зміна відношення розмірів зерен в перпендикулярному ( $D_L$ ) та паралельному напрямках навантаження. Відмічається сильна неомогенність структури зерен (білі, чорні та сірі області) [13].

При дослідженні особливостей технології отримання ультрадрібнозернистих й наноструктурних різних зразків й сплавів за допомогою різних методів ІПД при кімнатній температурі, протікаючі процеси динамічного повернення та рекристалізації не дають досягти високоміцного стану з оптимальним рівнем пластичності [24].

В зв'язку з цим в цей час проявляється дуже великий інтерес до дослідження мікроструктури й механічних властивостей різних сплавів, підданих ПД безпосередньо в рідкому азоті, або температурах близьких до них.



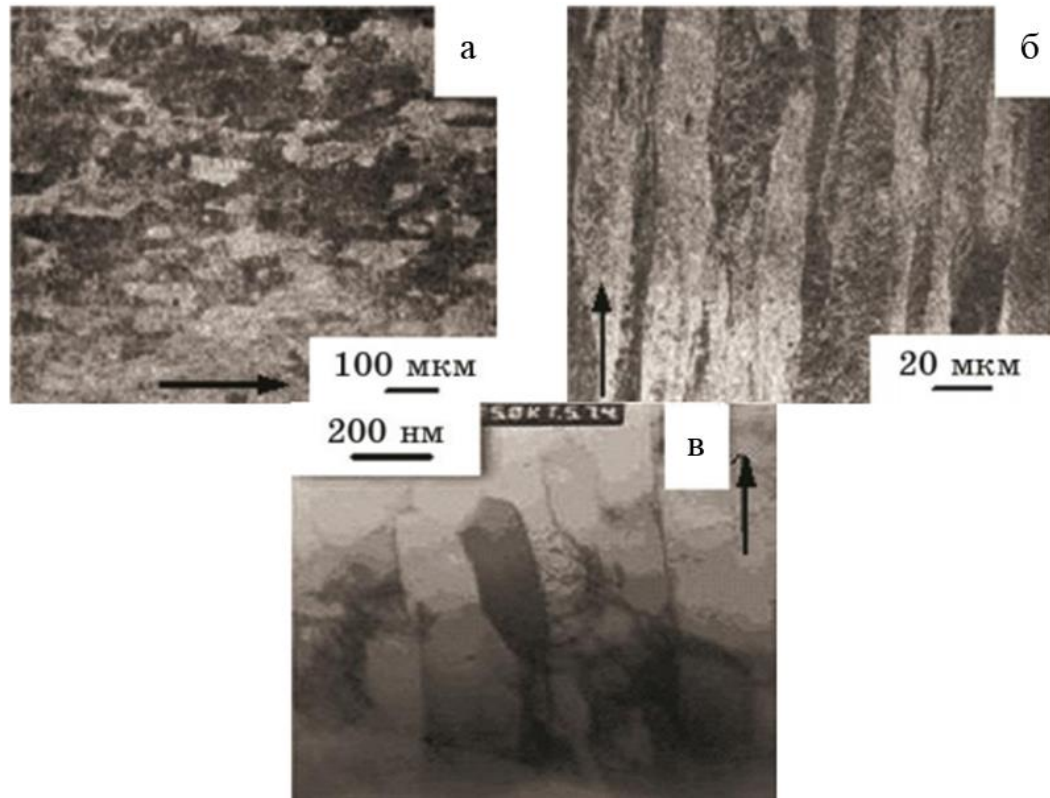
а –  $\varepsilon = 0$ ; б –  $\varepsilon = 0,4$ ; в –  $\varepsilon = 1,1$ ; г –  $\varepsilon = 2,1$ ; д – розподілення відношення довжини зерна до її ширини ( $D_L \div D_T$ )

Рисунок 1.1 – Мікроструктура міді для різних ступенів кріодеформації [23]

Робота [25] була присвячена впливу кріодеформації й наступному відпалу на структуру та властивості алюмінію.

Зразки технічного алюмінію піддавались інтенсивній прокатці після охолодження їх в рідкому азоті протягом 10 хв – 15 хв. В вихідних відпалених зразках розмір зерен становив 100 мкм – 200 мкм (рис. 1.2, а). Після кріопрокатки ( $\varepsilon = 0,75$ ) зерна видовжуються в напрямку прокатки (рис. 1.2, б) й мають субзерна з розмірами 0,25 мкм – 0,35 мкм по ширині й 0,5 мкм – 1,0 мкм по довжині (рис. 1.2, в). Наступний відпал при 190 °С

приводить до формування зерен розміром 300 нм – 400 нм. Після відпалу при більш високій температурі (275 °С) спостерігається рекристалізація зерен до розміру 500 нм [25].



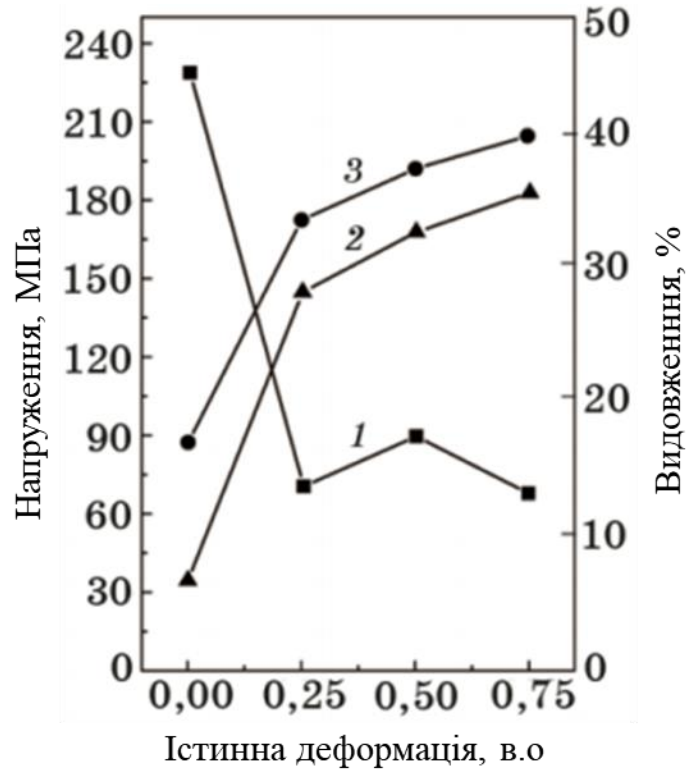
а – вихідний стан; б – кріодеформований стан;  
в – ТЕМ зображення

Рисунок 1.2 – Мікроструктура алюмінію після кріопрокатки на 75 % [25]

Зміна характеристик міцності й видовження в залежності від ступеню деформації приведені на рис. 1.3. Ефект підвищення характеристик міцності з ростом деформації автори пов'язують з пригніченням процесів динамічного повернення при низькій температурі й ростом щільності дислокацій [25].

Мідь та мідні сплави характеризуються середнім значенням енергії дефектів пакування. Тому великий інтерес представляє вивчення структури й механічних властивостей таких металів після деформації при кріогенних температурах. При низьких температурах пригнічується активність дислокацій і тому механічні двійники грають вирішальну роль в ПД.

Отримання об'ємної нанокристалічної міді традиційними методами ПД практично неможливе. В зв'язку з цим в роботі [13] застосовано метод прокатки за криогенних температурах.



1 – видовження; 2 – межа текучості; 3 – межа міцності

Рисунок 1.3 – Залежність механічних характеристик алюмінію від ступеню кріодеформації [26]

### 1.5 Висновки до розділу 1

1) вивчено літературні дані за темою магістерської дисертації та доведено актуальність теми роботи;

2) аналіз літературних джерел свідчить про те, що застосування методів пластичної деформації для поверхневого зміцнення латуней та сплавів на мідній основі за криогенних температур є актуальним завданням сучасного матеріалознавства.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Матеріал дослідження

В якості матеріалу для досліджень було обрано багатокомпонентний сплав ЛС59-1, хімічний склад якої визначено рентгенофлюорисцентним аналізом, та наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Відсотковий хімічний склад сплаву латуні ЛС59-1

Fe	P	Cu	Pb	Zn	Sb	Bi	Sn	Домішки
До 0,5%	До 0,02%	57-60%	0,8-1,9%	37,05%-42,2%	До 0,01%	До 0,003%	До 0,3%	Всього 0,75 %

Хоча сплав даної марки відноситься до категорії латуней, які добре оброблюються тиском, частіше всього вироби з нього оброблюють на швидкісних металорізальних станках. Через це латунь ЛС59-1 частіше всього відносять до категорії автоматних сплавів. Характеристики латуні цієї марки визначає свинець, який становить у сплаві окрему фазу і який входить до її складу як легуючий елемент. Цей сплав добре піддається і пластичній деформації.

Завдяки наявності свинцю в складі ЛС59-1 при обробці виробів з нього різанням утворюється мілка стружка, яка дозволяє виконувати таку обробку на великих швидкостях.

Між цим, якщо порівнювати латунь марки ЛС59-1 з двокомпонентними сплавами, то вона значно програє їм по своїй пластичності, тому цей матеріал краще оброблювати різанням.

Відрізняють латунь марки ЛС59-1 й хороші антифрикційні властивості, що дозволяє використовувати даний сплав для виготовлення виробів, які експлуатуються в умовах підвищеного тертя. З цього сплаву, зокрема, виготовляють підшипники ковзання, які використовуються для комплектації різних механізмів та машин. Крім того стійкість до стирання, якою

відрізняється ЛС59-1, дозволяє використовувати цю латунь для виготовлення направляючих станків різного призначення.

Оскільки, латунь ЛС59-1 має багатофазну структуру, то вироби з неї відрізняються особливо підвищеною крихкістю. Деталі з цього сплаву, на яких виконані поверхневі надрізи, не можна використовувати в якості несучих елементів, так як при значному тиску вони можуть зламатись. Крім того, підвищена крихкість цієї латуні приводить до того, що при впливі ударних навантажень, поверхня виробів з цього матеріалу може покриватись тріщинами, що не дозволяє виконати їх обробку за допомогою такої технологічної операції, як ковка.

## **2.2 Методика та режими УЗУО**

Ультразвукова ударна обробка здійснювалась на виготовленому в Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України приладі УЗГ–300. Прилад складається з ультразвукового генератора частотою 21 кГц й потужністю 0,6 кВт, вібратора зі ступінчастим концентратором, на якому за допомогою пружин розміщується ударна головка з сімома циліндричними бойками діаметром 5 мм та довжиною 18 мм. Ударна головка здійснювала обертові рухи під час обробки, що дозволило здійснити деформацію поверхні ударною імпульсною дією з частотою  $\nu \sim 1 \text{ кГц} - 3 \text{ кГц}$  [8].

Ця конструкція дозволяє проводити рівномірну деформаційну обробку в автоматизованому режимі та отримувати при цьому рівномірний рельєф поверхні. Також охолоджувати систему деформуючих елементів стисненим повітрям в при обробці, та замінити їх якщо виникла необхідність. Заданий ступінь деформаційного зміцнення забезпечується вибором наступних параметрів: амплітуди ультразвукових коливань торця , швидкості обертання тримача з деформуючими бойками [27].

Коливання торця концентратора завдяки ударній взаємодії надається бойкам, які вже деформують поверхню зразка чи виробу. Далі вмикається токарний станок, що автоматично переміщує супорт по ходовому гвинту: це



дозволяє переміщувати вісь пристрою відносно поверхні зразка, який в свою чергу є нерухомим. Наряду з цим, обертання державки з регульованою швидкістю, який задається напругою на електродвигун, що підвищує рівномірність деформаційного зміцнення та якість поверхні.

При тривалій обробці вмикається подача стисненого повітря через вхідний патрубок та пази, забезпечуючи охолодження системи в процесі обробки.

Ультразвукова ударна обробка здійснювалась в середовищі рідкого азоту (77 K) при умовах квазі-гідростатичного стиснення зразка.

За квазі-гідростатичного стиснення зразка зсувна компонента навантаження відсутня. Застосовується лише один бойок, а оброблюваний зразок в свою чергу розміщений у спеціальній сталій оправці, в яку заглиблений на 2 мм (рис. 2.1).

Таким чином, в процесі контактної обробки, зразок постійно розміщений в зоні дії ударника у замкненому об'ємі. Іншими словами, в умовах, що максимально наближені до умов квазі-гідростатичного стиснення. Тривалість обробки за таких умов здійснювалась від 5 с до 200 с.

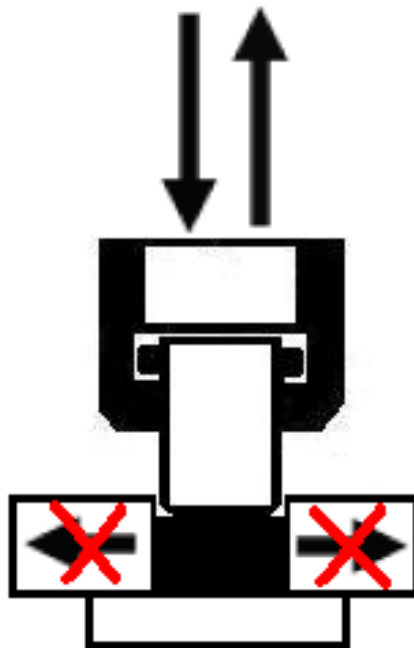


Рисунок 2.1 – Схема УЗУО за квазі-гідростатичного стиснення зразка [27]

Швидкість деформації та ступінь істинної деформації знаходилась в інтервалах:  $\epsilon = 0,1 - 5,0$  та  $\dot{\epsilon} = 0,1 \text{ с}^{-1} - 1,1 \text{ с}^{-1}$ , відповідним чином. Максимальна ступінь істинної деформації при УЗУО близька до значень, які досягаються за відомим способом ІПД, крученням під тиском (наковальня Бріджмена).

## 2.3 Методика досліджень

Відповідно до поставлених завдань, в роботі було використано комплекс сучасних фізичних методів дослідження, а саме: мікродюрOMETричний, рентгеноструктурний аналіз, скануючу та просвічуючу електронну мікроскопію, мікрорентгеноспектральний аналіз, розрахунок залишкових напружень, метод неперервного вдавлення індентора.

### 2.3.1 МікродюрOMETричний аналіз

Вимірювання мікротвердості поверхневих шарів та за глибиною модифікованого шару матеріалу проводилось за допомогою приладу ПМТ-3М, за методом Вікерса. Даний метод базується на визначенні лінійної величини діагоналі відбитку, яку отримано в результаті втискання алмазної пірамідки, з кутом при вершині  $136^\circ$ , в матеріал, що досліджується під якимось навантаженням.

Вимірювання проводились у вихідному стані та після УЗУО в середовищі рідкого азоту різної тривалості. Кількість вимірювань для визначення мікротвердості поверхневих шарів становила 20: 10 – в центрі та 10 – по краю вимірюваного зразка, після цього обчислювалось середнє значення мікротвердості. Для визначення мікротвердості за глибиною модифікованого шару вимірювання проводилось до тих пір, поки значення мікротвердості не наближалось практично до значень мікротвердості при вихідному стані.

Вимірювання значень мікротвердості поверхневих шарів здійснювалось за навантаження 100 г, а за глибиною модифікованого шару –

за навантаження 20 г. Вибір величини навантаження здійснювався так, аби внесок у мікротвердість спричинявся змінним шаром та без впливу матеріалу основи.

Ціна поділки барабану гвинтового окуляр-мікрометру  $E$  визначається за такою формулою:

$$E = \frac{T \times Z}{A}, \quad (2.1)$$

де  $T$  – число поділок об'єкт-мікрометру,

$Z$  – ціна поділки об'єкт мікрометру,

$A$  – різниця відліку окулярного мікрометру

Значення мікротвердості  $H_V$  визначалось за формулою:

$$H_V = \frac{1,854P}{C^2}, \text{ ГПа} \quad (2.2)$$

де  $P$  – навантаження в грамах,

$C$  – діагональ відбитку

В роботі також застосовувався розрахунок за значенням мікротвердості таких параметрів як: межа текучості ( $\sigma_{0,2}$ ), характеристики пластичності ( $\delta_n$ ) та межа міцності ( $\sigma_S$ ) [28].

Параметр  $\delta_n$  характеризує пластичність матеріалів часткою пластичної деформації в спільній пружньопластичній деформації. Він дозволяє проаналізувати й порівняти пластичність матеріалів, крихких при стандартних механічних випробуваннях.

Величина  $\delta_n$  була розрахована за формулою:

$$\delta_n = 1 - 14,3(1 - \nu - \nu^2) \frac{H_V}{E}, \quad (2.3)$$

де  $H_V$  – мікротвердість по Вікерсу,

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона сплаву ЛС59-1,

$E$  – модуль Юнга сплаву ЛС59-1

Параметр  $\sigma_{0,2}$  – напруження, при якому залишкова деформація досягає якогось значення, встановленого технічними умовами (більшого за встановлене значення для межі пружності).

За значенням величини мікротвердості, розрахованої за формулою 2.2 розраховано межу текучості  $\sigma_{0,2}$  (2.4):

$$Hv \approx \sigma_{0,2}, \text{ ГПа} \quad (2.4)$$

Межа міцності  $\sigma_s$  – напруження, що відповідає найбільшому зусиллю, що досягається в процесі деформування зразка матеріалу до його руйнування.

Розраховано межу міцності  $\sigma_s$  за значенням величини мікротвердості:

$$\sigma_s = \frac{Hv}{(0,28 + 0,6 \times \ln\left(\frac{3 \times E}{(4 + \nu) \times \sigma_{0,2}}\right))} \quad (2.5)$$

2.3.2 Скануюча електронна мікроскопія (СЕМ) та мікрорентгеноспектральний аналіз

Дослідження мікроструктури й хімічного складу поверхневих шарів та поперечного перерізу виконувалось на скануючому електронному мікроскопі РЕММА-106И з енергодисперсійним аналізатором (ЭДАР). При зйомці поверхневих шарів зразків прискорююча напруга становила 30 кеВ, збільшення від 500 разів до 3000 разів.

Скануюча електронна мікроскопія дозволяє отримати зображення поверхні зразка з роздільною здатністю до декількох нанометрів. Зображення трьохмірні, та це зручно для того, щоб вивчити структуру поверхні. Також СЕМ дозволяє отримати елементний склад поверхні.

Енергодисперсійний аналізатор використовується для того, щоб здійснити експрес-аналіз хімічного складу поверхневих шарів в мікрооб'ємах під бомбардуванням електронним променем. Система ЭДАР – спектрометр енергій рентгенівського випромінювання в діапазонах 1 кеВ – 40 кеВ. Використовуючи даний спектрометр було здійснено кількісний елементний аналіз як поверхневих шарів після УЗУО, так і за товщиною модифікованого шару.

### 2.3.3 Електронно-мікроскопічний аналіз структури методом тонких фольг

Електронно-мікроскопічний аналіз структури методом тонких фольг виконувався за допомогою просвічуючого мікроскопу JEM-100 CX-II. Просвічуючий електронний мікроскоп застосовується для прямого електронно-мікроскопічного аналізу кристалічних об'єктів і дозволяє проводити наступні роботи:

- 1) мікроскопічну зйомку в прямому пучку (світлопольне зображення);
- 2) мікроскопічну зйомку в дифрагованих пучках (темнопольне зображення);
- 3) зйомку електроннограм при освітленні електронним пучком великої площі зразка (звичайна дифракція);
- 4) зйомку електроннограм від малої обраної ділянки зразка, зображення якого спостерігається на екрані (мікродифракція).

В режимі зйомки тонких фольг прискорююча напруга становила 25 кВ – 50 кВ. Вакуум у колоні становив  $\approx 10^{-3}$  Па, а в області гармати  $10^{-4}$  Па. Збільшення складало (300 – 850000) разів. За допомогою ТЕМ можна досліджувати мікроструктуру й фазовий склад з роздільною здатністю 0,2 нм – 0,3 нм та збільшенням до 850000 разів.

Отримання тонкої фольги зі сплаву ЛС59-1 здійснювалось методом електролітичного полірування, який являє собою процес, зворотний до

процесу електролітичного осадження металів: оброблювані вироби поміщають в якості анодів в ванну з відповідним електролітом і витримують їх при заданому режимі протягом певного часу – від декількох секунд до десятків хвилин. Електролітичне полірування проводиться за заданим режимом з метою отримання поверхні, що відповідає технічним вимогам.

#### 2.3.4 Рентгенівські методи дослідження

Дослідження фазового складу – кількісного та якісного, здійснювалось на рентгенівському дифрактометрі Rigaku Ultima IV (рис. 2.2). Даний прилад дає змогу визначати: період кристалічної ґратки ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ), розмір областей когерентного розсіювання (ОКР), залишкові макронапруження методом  $\sin^2\psi$ , ступінь деформації ґратки, орієнтацію кристалів, ступінь кристалічності та товщину нанесених покриттів.



Рисунок 2.2 – Рентгенівський дифрактометр Rigaku Ultima IV

В даному приладі використовується схема фокусування за Брегом – Брентано. Зразок встановлюють таким чином, щоб вісь обертання дифрактометра лежала в площині зразка та нормаль до поверхні була бісектрисою кута, який утворений падаючим пучком та відбитим пучком рентгенівських променів, які потрапляють в лічильник [29].

Зйомка зразків проведена в мідному випромінюванні ( $\text{Cu}_{\text{K}\alpha} = 0,15418 \text{ нм}$ ). Параметри зйомки: інтервал кутів  $2\Theta = 10^\circ - 120^\circ$ , крок зйомки –  $0,04^\circ$ , час витримки в точці – 2 с, тривалість зйомки – 90 хв.

Аналіз отриманих рентгенівських спектрів та проведення кількісного та якісного фазового аналізу здійснено з використанням програмного забезпечення PDXL, міжнародної бази даних PDF-2 та відкритої бази кристалографічних даних COD. Знаходження ОКР та ступеню деформації кристалічної решітки проведено за допомогою методу Холдера-Вагнера.

Кількісний фазовий аналіз проведений методом RIR (Reference Intensity Ratio або метод коруднових чисел).

### 2.3.5 Розрахунок залишкових макронапружень методом $\sin^2\psi$

Макронапруження – це напруження, які існують в матеріалах в межах розміру зерна за умов відсутності зовнішнього впливу (силового, температурного тощо) після процесу їх обробки або виготовлення. Вони виникають при неоднорідному зовнішньому впливі на них в процесі їх одержання або обробки [30].

Оскільки ці макронапруження характеризуються однорідним розтягненням або стисканням кристалічної ґратки, то це призводить до однорідної зміни міжплощинних відстаней на величину  $\Delta d$  [30].

Тому основним параметром, який дозволяє визначити макронапруження є  $d$  – міжплощинні відстані, які в усіх кристалітах матеріалу однаково орієнтовані по відношенню до всіх діючих пружних напружень, змінюються однакового:  $\Delta l/l = \Delta d/d$ , де  $\Delta l/l$  – відносне видовження зразка  $l$  [30].

З огляду на це співвідношення, для одновісного розтягу величина пружних напружень визначається за формулою:

$$\sigma = \left(\frac{E}{\nu}\right) \operatorname{ctg} \theta \Delta \theta, \quad (2.6)$$

де  $E$  – модуль пружності сплаву ЛС59-1,

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона сплаву ЛС59-1,

$\Delta \theta$  – зміщення рентгенівської лінії під дією пружних напружень.

Об'ємно-напружений стан описується трьома нормальними напруженнями  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , що діють в трьох головних напрямках. Але рентгенографічним методом можна досліджувати тільки приповерхнений шар виробу (10 мкм), для цих задач прийнято розглядати плоско-напружений стан, для якого  $\sigma_3 = 0$  [30].

Тоді, величина пружної деформації визначається за наступною формулою:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \left(\frac{1}{E}\right) (\sigma_1 - \nu \sigma_2), \\ \varepsilon_2 &= \left(\frac{1}{E}\right) (\sigma_2 - \nu \sigma_1), \\ \varepsilon_3 &= \left(\frac{1}{E}\right) (\sigma_1 + \sigma_2). \end{aligned} \quad (2.7)$$

Знаходження величини залишкових макронапружень для латуні ЛС59-1 проводилось у вихідному стані та після УЗУО в середовищі рідкого азоту, різної тривалості. Дослідження проводились методом  $\sin^2 \psi$  за дифракційним максимумом (311), зі значенням кута нахилу  $\psi = 0^\circ - 40^\circ$ , кроком  $0,02^\circ$  та часом витримки 2 с.



### 2.3.6 Метод неперервного вдавлювання індентора

Метод мікромеханічних випробувань, що заснованг на неперервній реєстрації вдавлювання індентора, останнім часом досить широко застосовують в випробуваннях поверхневих шарів композиційних матеріалів для оцінки міцнісних властивостей композиційних матеріалів на основі металів, кераміки, плівок, напівпровідникових матеріалів та інших [31].

Показано, що за допомогою форми індентора можна реєструвати як традиційні, так і нетрадиційні діаграми деформування поверхневих шарів, а при застосуванні традиційних формул для розрахунку мікротвердості необхідно корегувати отримані розрахункові значення [31].

Експериментальні результати показали, що цей метод є високочутливим до процесів структурної перебудови поверхневих шарів матеріалів, що є досліджуваними, і може бути використаний у разі оптимізації складу і технологічних процесів отримання нових пористих каталізаторів [31].

Вченими були визначені можливості цього методу для:

- 1) виявлення кінетичних й структурних закономірностей мікропластичної деформації й оцінки мікронеоднорідностей на кривих активного напруження;
- 2) оцінки пружних й релаксаційних властивостей поверхневого шару з використанням оцінки величини пружного відновлення глибини відбитка;
- 3) оцінки модуля пружності, анізотропії властивостей, закономірностей повзучості й релаксації напружень;
- 4) оцінки поверхневої енергії чи в'язкості руйнування (для крихких матеріалів) [31].

Реалізація методу здійснюється шляхом одночасної реєстрації глибини вдавлювання індентора  $h$  й навантаження  $P$ , на основі чого будуються двокоординатні діаграми  $P = f(h)$  (рис. 2.3). Метод, окрім визначення істинної та відновленої твердості дозволяє зробити оцінку ряду параметрам, які характеризують фізико-механічні й структурні властивості матеріалу.

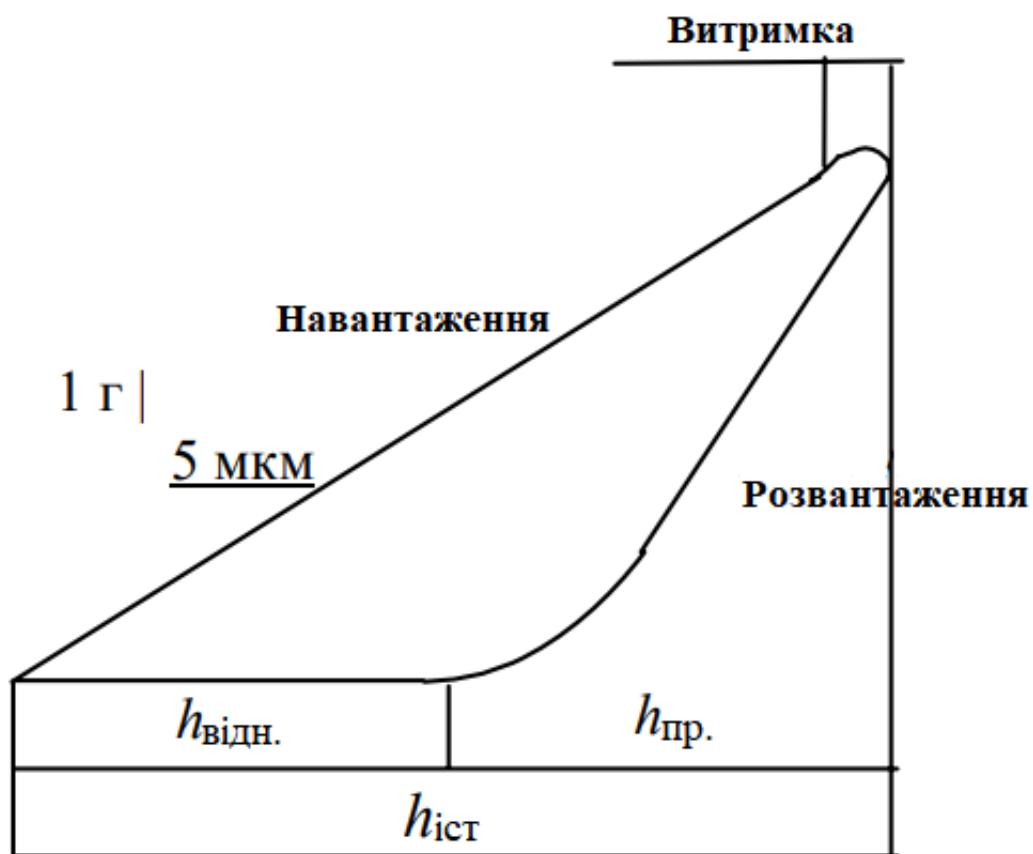


Рисунок 2.3 – Двокоординатна діаграма деформування [31]

Дослідження проводились з використанням універсального мікро, нано твердоміра «Micron-Gamma» (рис. 2.4).

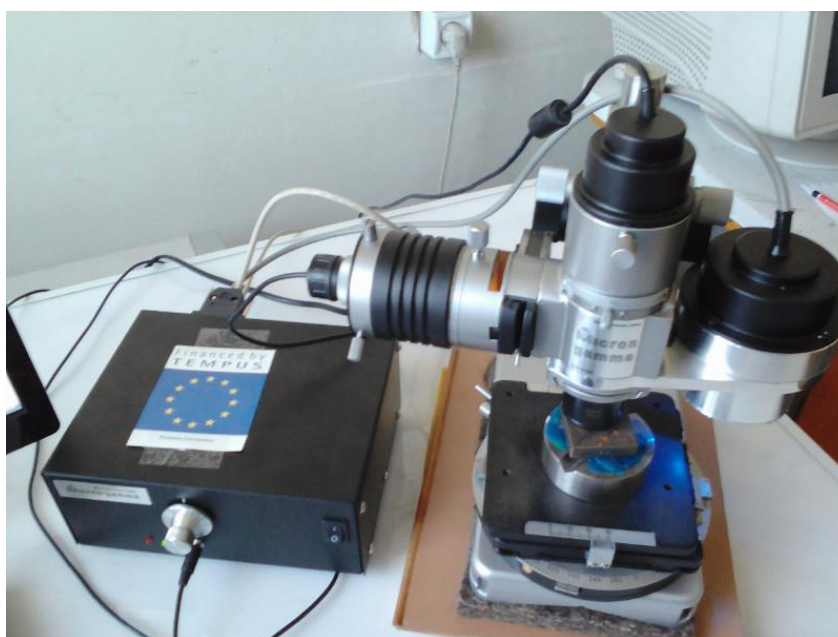


Рисунок 2.4 – Загальний вигляд приладу "Micron-gamma"

## **2.4 Висновки до розділу 2**

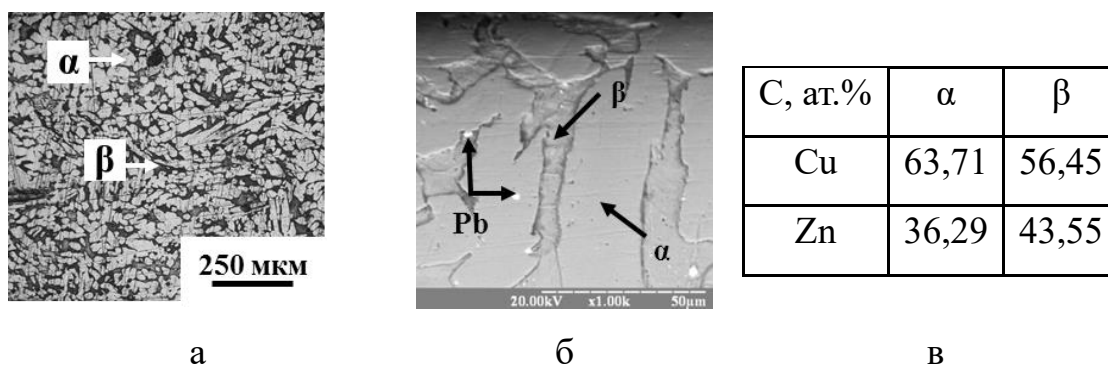
1) для вирішення поставлених завдань в роботі було використано комплекс сучасних фізичних методів дослідження матеріалів: мікродюрOMETричний, рентгеноструктурний аналіз, скануючу та просвічуючу електронну мікроскопію, мікрорентгеноспектральний аналіз, розрахунок залишкових напружень, метод неперервного вдавлювання індентора;

2) обрані експериментальні методи дають змогу повністю оцінити фазовий склад, морфологію, структуру поверхневих шарів латуні ЛС59-1 після кріо-УЗУО.

### 3 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Механічні характеристики поверхневих шарів сплаву латуні ЛС59-1 після УЗУО в середовищі рідкого азоту

Мікроструктура латуні у вихідному стані після відпалу сформована сумішшю зерен  $\alpha$ - і  $\beta$ -фаз (рис. 3.1, а), а також містить включення свинцю (Pb) в обох фазах (рис. 3.1, б). Зазначені фази мають різну будову кристалічних ґраток:  $\alpha$ -фаза з ГЦК кристалічною ґраткою – це твердий розчин цинку в міді. Як зазначалось вище, відпал сприяв утворенню значної кількості  $\beta$ -фази – твердого розчину на базі хімічної сполуки CuZn з ОЦК кристалічною ґраткою. Дані, отримані за допомогою енергодисперсійного рентгенівського аналізу фазових складових у растровому електронному мікроскопі, засвідчили різницю у вмісті основних хімічних елементів у  $\alpha$ - і  $\beta$ -фазах (рис. 3.1).



а – оптична мікроскопія; б – растрова електронна мікроскопія;

в – хімічний склад латуні ЛС59-1 у вихідному стані

Рисунок 3.1 – Мікроструктура та хімічний склад латуні ЛС59-1 у вихідному стані

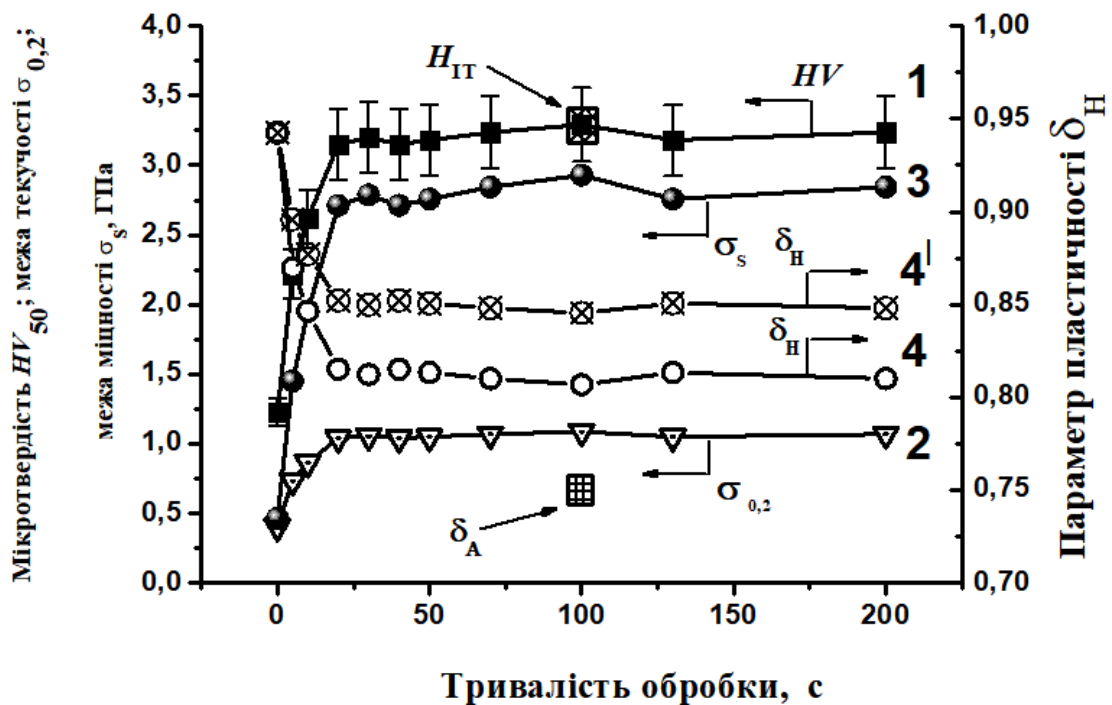
Отримані результати корелюють з даними роботи [32], у якій виявлене зростання твердості після витримки у середовищі рідкого азоту було пояснене зміною зеренної структури. Слід також згадати роботи [33, 34], що

описують перебіг процесів впорядкування та мартенситних перетворень за пониження температур до температур рідкого азоту навіть з певним проявом ефекту пам'яті форми. Перебіг прямих і зворотних мартенситних перетворень може також бути додатковим чинником зміцнення. Так, наприклад, у [35] показана можливість зміцнення сталевих зразків за рахунок багатократного  $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$  перетворення. Це призводить до суттєвого подібнення структурних елементів до нано-рівня [36].

У той же час за умов УЗУО ефект зміцнення становить  $\sim 2,6$  разів і досягається вже після 20 с обробки (рис. 3.2, крива 1). Визначити зміну мікротвердості окремо для  $\alpha$ - та  $\beta$ -фаз після УЗУО не вдається, тому мається на увазі усереднене значення величини мікротвердості. Це може підтверджувати припущення про ефективність багатократних прямих та зворотних мартенситних перетворень для зміцнення. У випадку УЗУО в середовищі рідкого азоту фазові перетворення можуть проходити за рахунок охолодження до криогенних температур і наступного періодичного нагрівання та охолодження впродовж високочастотної ударної обробки. Тому цілком можливим є ефект фазового нагартування в зернах  $\alpha$ -фази за рахунок циклічного прикладення напружень, за рахунок зміни об'єму зерен.

Залежності зміни мікротвердості, межі текучості, межі міцності та характеристики пластичності латуні ЛС59-1 в залежності від тривалості обробки в середовищі рідкого азоту, протягом 5 с – 200 с, отримані із застосуванням формул (2.3) – (2.5), мають подібний характер. Найбільш значні зміни відбуваються на початкових стадіях УЗУО (рис. 3.2). Характеристика пластичності також зменшується в порівнянні з вихідним значенням (0,936) вже на початкових стадіях деформації (УЗУО впродовж 20 с). Величина межі текучості  $\sigma_{0,2}$  та межі міцності  $\sigma_s$  збільшується порівняно з вихідним станом латуні ЛС59-1 в 3 та 4 рази, відповідно (рис. 3.2, криві 2, 3). Дані зміни пов'язані з суттєвим зростанням мікротвердості. Подальше збільшення тривалості крио-УЗУО не призводить до суттєвого зростання механічних характеристик ( $H_v$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_s$ ,  $\delta_H$ ).

Час обробки також суттєво не впливає на значення характеристики пластичності  $\delta_H = 0,827 - 0,883$ .



$H_{IT}$  – інструментальна твердість,  $\delta_A$  – характеристика пластичності

Рисунок 3.2 – Мікротвердість  $Hv_{100}$  (1), межа текучості  $\sigma_{0,2}$  (2), міцності  $\sigma_s$  (3) та характеристика пластичності  $\delta_H$  (4) латуні ЛС59-1 після УЗУО в середовищі рідкого азоту ( $A = 25$  мкм)

Отримані результати узгоджуються з даними роботи [37], у якій також було виявлено підвищення  $Hv$  після динамічної пластичної деформації за температури рідкого азоту. Слід зазначити, що у випадку УЗУО в середовищі рідкого азоту мікротвердість зростає в 2 рази, що в 5 разів перевищує ефект зміцнення після витримки в середовищі рідкому азоті (рис. 3.1). Як зазначалось вище, можливим поясненням такого зростання ступеню зміцнення може бути факт багатократного перебігу впорядкування/втрати порядку та фазових перетворень у  $\beta$ -фазі [35] та фазового нагартування  $\alpha$ -фази за умов кріогенної УЗУО. Крім того, згідно [37] динамічна пластична деформація може спричиняти появу високою щільністю дислокацій, двійників і смуг зсуву, які за рахунок пересічення сприяють утворенню

нанорозмірних зерен. Зазначені типи дефектів можуть відігравати важливу роль у зміцненні.

Результати зміни мікротвердості після УЗУО в середовищі рідкого азоту наведено на рис. 3.3.

УЗУО на повітрі дозволяє досягти ефекту зміцнення 207 % ( $Hv_{100} = 2,8$  ГПа) за 5 с тривалості оброблення. При подальшому обробленні спостерігається подальше стрімке зростання величини мікротвердості до  $\tau = 20$  с, де ефект зміцнення досягає 330 % ( $Hv_{100} = 4,45$  ГПа). Подальше збільшення тривалості УЗУО до 50 с не приводить до істотного збільшення величини мікротвердості. Максимальний ефект зміцнення для УЗУО на повітрі досягає 345 % ( $Hv_{100} = 4,64$  ГПа) [38].

При УЗУО в інертному середовищі, навпроти від повітря вже не можна досягти такого ефекту зміцнення. Після 5 с обробки ефект зміцнення становить 154 % ( $Hv_{100} = 2,08$  ГПа). При подальшому збільшенні спостерігається поступове зростання величини мікротвердості і при 50 с ефект зміцнення досягає 182 % ( $Hv_{100} = 2,47$  ГПа) [38].

УЗУО в середовищі рідкого азоту на першому етапі дозволяє досягти ефекту зміцнення 190 % за 20 с обробки (рис. 3.3). При збільшенні до 50 с спостерігається деяке зменшення мікротвердості, тому було збільшено тривалість обробки до 200 с. Спостерігається коливання значень мікротвердості у вузькому діапазоні від 20 с до 120 с і остаточне зміцнення на останньому етапі від 140 с до 200 с складає 176 %. Максимальне значення мікротвердості сягає 2,44 ГПа [39].

Згідно отриманим значенням можна зробити висновок, що максимальні значення мікротвердості можна досягти при обробці на повітрі  $Hv_{100} = 4,64$  ГПа. Для середовища рідкого азоту  $Hv_{100} = 2,43$  ГПа, для інертного середовища  $Hv_{100} = 2,47$  ГПа. Такі високі значення мікротвердості при обробці на повітрі пояснюються процесами активного оксидування на поверхні, що не завжди відіграє позитивну роль у зміцненні поверхні. Суттєво зростає шорсткість поверхні.

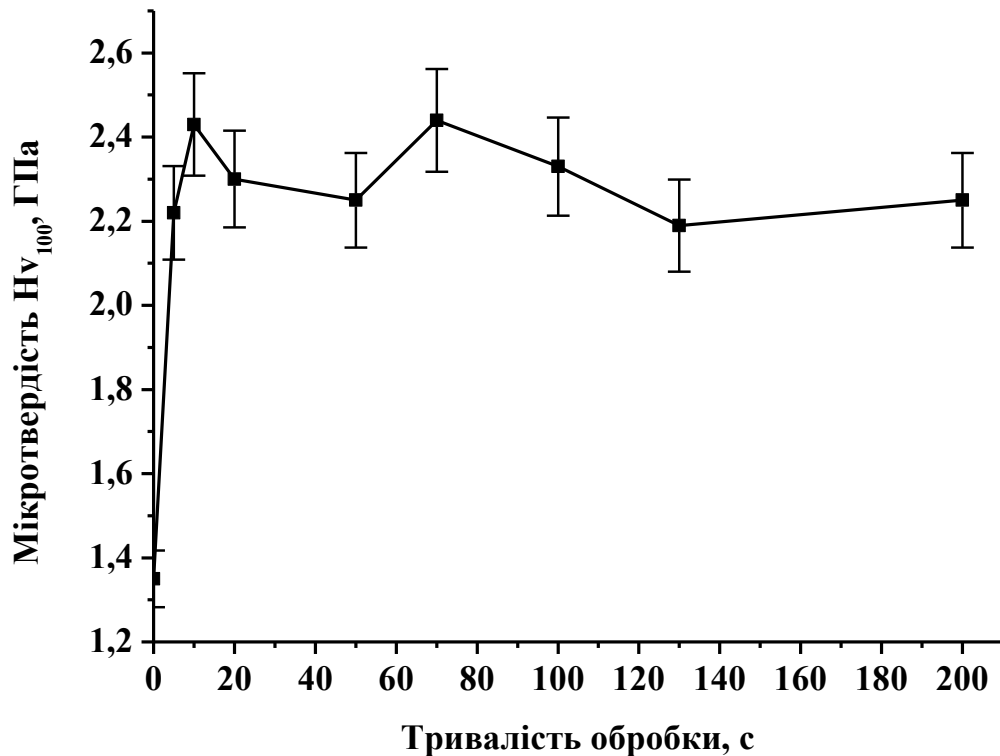


Рисунок 3.3 – Зміна мікротвердості  $H_{v100}$  латуні ЛС59-1 після височастотного ударного оброблення в середовищі рідкого азоту [39]

Для зразка латуні після УЗУО впродовж 100 с, для якого спостерігалось найбільше значення мікротвердості на поверхні, визначено зміну мікротвердості за глибиною модифікованого шару при навантаженні 20 г (рис. 3.4). На залежності  $H_{v20}$  від відстані від обробленої поверхні можна виділити п'ять областей. Перша область товщиною  $\sim 120$  мкм характеризується максимальним значенням мікротвердості  $H_{v20} = 2,4$  ГПа, яке все ж дещо нижче від значення, отриманого для поверхневої мікротвердості (за умов перпендикулярного прикладення навантаження до поверхні зразка). У другій області товщиною  $\sim 180$  мкм спостерігається стрімке зменшення мікротвердості до 1,4 ГПа. У третій області суттєвих змін значення мікротвердості не відбувається  $H_{v20} \approx 1,35$  ГПа. Товщина цієї області дорівнює  $\sim 350$  мкм. Область IV, як і область II, є перехідною в якій мікротвердість знову дещо зменшується до вихідного значення 1,13 ГПа. Область V – матричний сплав (серцевина, у якій відсутні ознаки зміцнення).



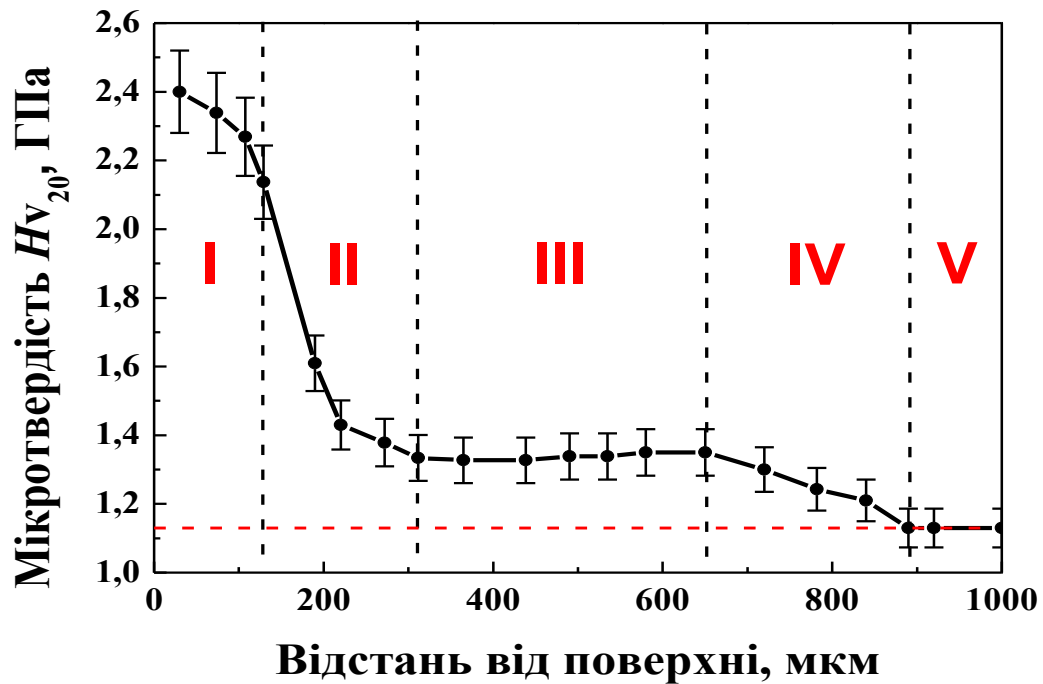


Рисунок 3.4 – Зміна мікротвердості  $H_{v20}$  за глибиною модифікованого шару латуні ЛС59-1 після УЗУО в рідкому азоті ( $\tau = 100$  с,  $A = 25$  мкм)

Загалом ефект зміцнення після УЗУО в середовищі рідкого азоту сягає глибини  $\sim 900$  мкм, яка значно більше ніж для сплаву Д16 [40] або неіржавіючої сталі [41, 42].

Для прогнозування багатьох експлуатаційних характеристики матеріалів крім мікротвердості важливими є дані про інші фізико-механічні властивості, такі як пластичність та модуль пружності.

Відомо, більш повну інформацію про фізико-механічні властивості матеріалу, ніж із розміру відновленого відбитку (як у випадку вимірювання  $H_v$ ), можна отримати з аналізу діаграми безперервного вдавлювання (індентування) індентора за автоматичної реєстрації навантаження ( $P$ ) на індентор та глибини його вдавлювання ( $h$ ). Обробка таких діаграм дозволяє визначити мікро/нано твердість, модуль пружності, вивчати особливості мікродеформування за кінетикою вдавлювання індентора [43].

На рис. 3.5 наведено діаграми вдавлювання та відповідні мікрофотографії поверхні зразків латуні ЛС59-1 із відбитками індентора та

отримані результати досліджень їх механічних властивостей (середнє значення твердості  $H_{IT}$ , пластичності  $\delta_A$ , та контактного модуля пружності  $E$  та % розкид значень) після УЗУО ( $A = 25$  мкм,  $\tau = 20$  с) у середовищі рідкого азоту (1) у порівнянні із вихідним станом (2).

Отримані результати свідчать про те, що глибина проникнення індентора в поверхню зразка після обробки в середовищі рідкого азоту становить  $\sim 2,68$  мкм –  $2,92$  мкм, для зразка у вихідному стані вона становить  $3,6$  мкм –  $3,82$  мкм. Твердість, визначена методом інструментального індентування, середнє значення якої становить  $\sim 3,34$  ГПа в поверхневому шарі після УЗУО та  $\sim 1,62$  ГПа у вихідному стані узгоджується з результатами одержаними за методом Вікерса. Також спостерігається подвійне збільшення твердості після криогенної обробки. Середнє значення контактного модуля пружності після обробки в середовищі рідкого азоту становить  $\sim 88,26$  ГПа, що суттєво менше порівняно із вихідним станом ( $E \sim 107,2$  ГПа). Також зафіксовано зменшення значення характеристики пластичності  $\delta_A = 0,747$  порівняно із вихідним станом  $\delta_A = 0,879$ . Зазначене значення контактного модуля пружності ( $E \sim 88,26$  ГПа) було використано для оцінок механічних характеристик згідно формул (2.3) і (2.4), наведених на рис. 3.2 (криві 4 і 3, відповідно). Застосування для оцінок саме цієї вимірної величини  $E$  дозволяє наблизити розрахункові величини характеристики пластичності  $\delta_H$ , отримані за формулою (2.3) (крива 4 на рис. 3.2), до значення  $\delta_A$ , визначеного методом інструментального індентування (табл. 3.1). У разі застосування табличного значення модуля пружності відмінність величин, отриманих двома методами, зростає (крива 4' на рис. 3.2).

Діаграми вдавлювання індентора Берковича у поверхню латуні ЛС59-1 після УЗУО в середовищі рідкого азоту й вихідному стані представлено на рис. 3.5.

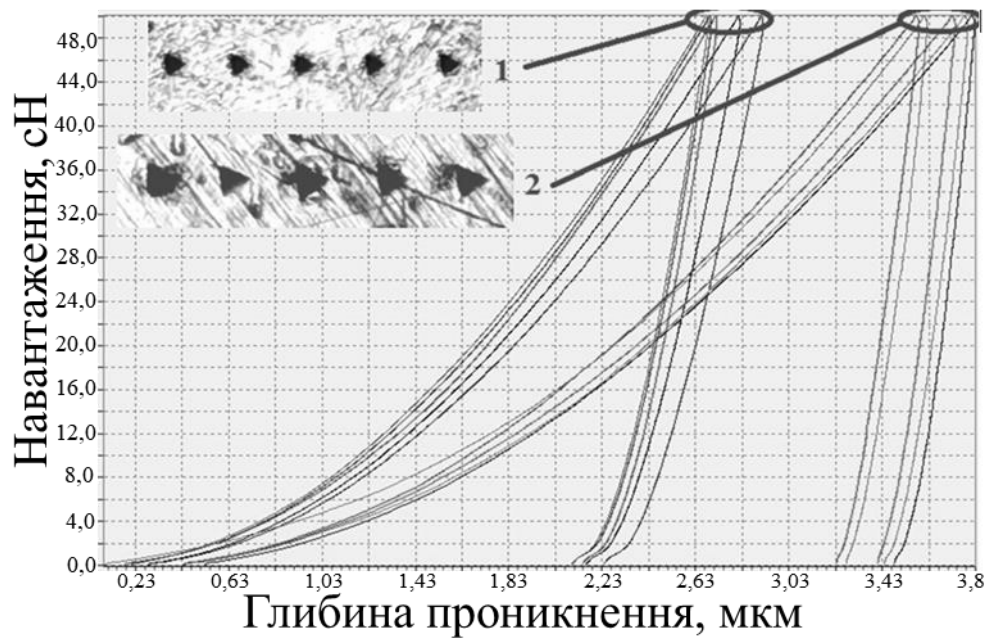


Рисунок 3.5 – Діаграми вдавлення індентора Берковича у поверхню латуні після УЗУО в середовищі рідкого азоту (1), у вихідному стані (2)

Таблиця 3.1 – Отримані механічні характеристики

№	Інструментальна твердість, $H_{IT}$ , ГПа	Відсотковий розкид значень, $\%H_{IT}$ , %	Контактний модуль пружності, $E$ , ГПа	Відсотковий розкид значень, $\%E$ , %	Характеристика пластичності, $\delta_A$
1	3,341	5,2	88,26	10,7	0,747
2	1,625	5,8	107,2	5,7	0,879

Згідно «моделі композиту» Муграбі зменшення значень модуля Юнга може відбуватися в результаті збільшення об'ємної частки меж зерен та потрійних стиків границь зерен, для яких механічні властивості відрізняються від об'єму зерна [44]. Як відомо, зменшення розмірів зерен від крупнокристалічного стану до субмікро- та нанорозмірних зерен призводить до зменшення пластичності зі збільшенням твердості, а також відіграє головну роль у зменшенні пружних властивостей наноматеріалів, оскільки значна доля атомів наноструктурного матеріалу розташована в границях

зерен і потрійних стиках, тобто у місцях, відмінних від нормальних позицій в кристалічній ґратці. Тобто, дані щодо зменшення контактного модуля пружності можуть бути опосередкованим проявом перебігу процесів нанокристалізації, які зазвичай відбуваються в приповерхневому шарі під дією УЗУО.

### 3.2 Структурно-фазовий стан поверхневих шарів латуні ЛС59-1 після високочастотного ударного оброблення в рідкому азоті

На рис. 3.6, б наведені залежності об'ємних часток  $\alpha$  і  $\beta$  фаз, оцінених за результатами рентгенівського фазового аналізу зразків латуні ЛС59-1 у вихідному стані та після високочастотної ударної деформації поверхні за допомогою ультразвуку (УЗУО) в рідкому азоті, проведеної впродовж різного часу (рис. 3.7). У вихідному стані кількість  $\beta$ -фази складає 45,3 % і близька до кількості  $\alpha$ -фази – 54,1 %. Обробка в середовищі рідкого азоту сприяє перерозподілу інтенсивності дифракційних рефлексів цих фаз, тобто зміні їх частки в поверхневому шарі. Після УЗУО протягом 20 с вміст  $\alpha$ -фази вже перевищує 70 % та майже не змінюється зі збільшенням тривалості обробки до 200 с.

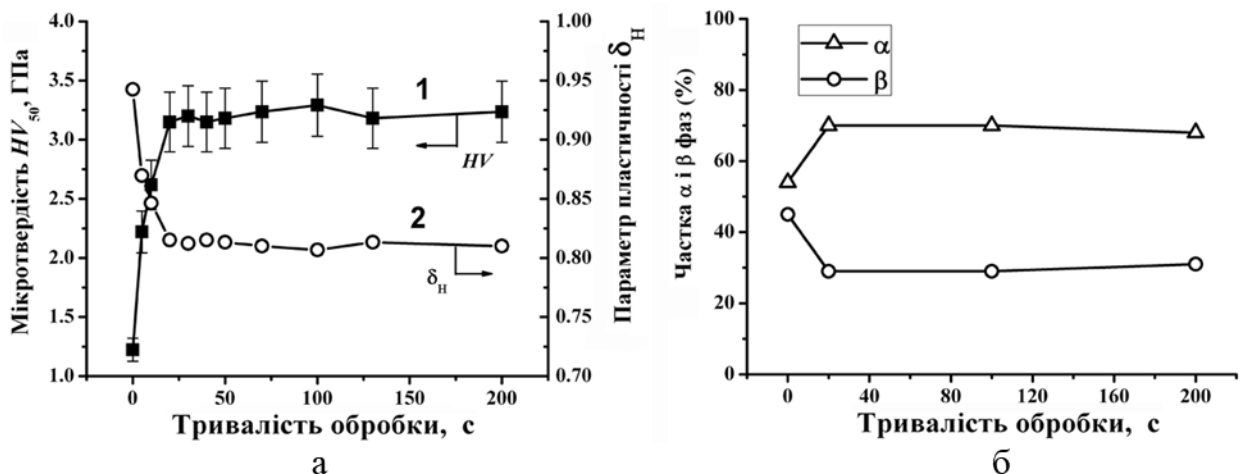
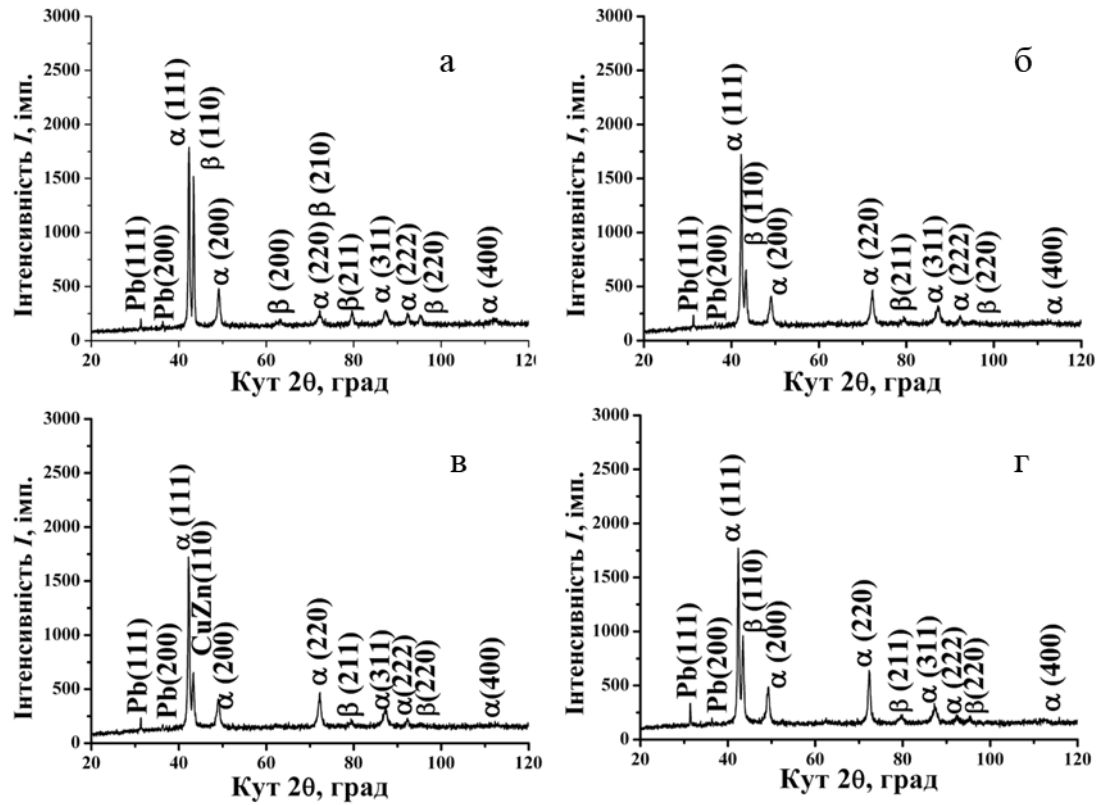


Рисунок 3.6 – Залежності мікротвердості  $Hv_{50}$  (1) та параметра пластичності  $\delta_H$  (2) (а) та фазовий склад поверхні латуні ЛС59-1 згідно даних рентгенофазового аналізу (б) від тривалості УЗУО в середовищі рідкого азоту ( $A = 25$  мкм)



а – вихідний стан, б – після УЗУО в середовищі рідкого азоту

впродовж 20 с, в – 100 с, г – 200 с

Рисунок 3.7 – Дифрактограми зразків латуні ЛС59-1

Порівняння результатів кількісного рентгенофазового аналізу та мікротвердості поверхні (рис. 3.6, а) дає можливість зробити висновок про те, що можна зробити висновок, зростання мікротвердості відбувається за рахунок зростання кількості  $\alpha$ -фази. Така кореляція між структурним чинником (рис. 3.8, а) і мікротвердістю  $Hv_{20}$  (рис. 3.8, б) також підтверджується результатами скануючої електронної мікроскопії та енергодисперсійного аналізу поперечного перерізу зразків, після УЗУО в середовищі рідкого азоту. Детальний аналіз хімічного складу (табл. 3.2) показав збільшення концентрації міді в поверхневих шарах, що узгоджується з даними рентгенофазового аналізу, (рис. 3.6, б; рис. 3.7) збільшенням кількості  $\alpha$  фази в латуні ЛС59-1. Зміна мікроструктури поперечного перерізу латуні (рис. 3.8, а) узгоджується з даними розподілу мікротвердості по товщині модифікованого шару (рис. 3.8, б). На відстані 100 мкм від поверхні

спостерігається переважно  $\alpha$ -фаза і мікротвердість максимальна, надалі – область товщиною до 200 мкм в якій зменшується кількість міді. В більш глибоких шарах поступово з'являється  $\beta$ -фаза і зростання величини мікротвердості відбувається за рахунок деформаційного наклепу, оскільки зміни фазового складу не відбувається. Крім того, не спостерігається суттєвого зростання втілених елементів із середовища обробки (азоту, кисню, вуглецю), як це раніше фіксувалось у оброблених за допомогою кріо-УЗУО сплавах титану [45, 46] та алюмінію [47].

Таблиця 3.2 – Хімічний склад поперечного перерізу латуні ЛС59-1 після УЗУО впродовж 100 с в середовищі рідкого азоту

Область дослідження	С, мас.%				
	C	N	O	Cu	Zn
1	0,73	0,10	0,25	58,62	40,3
2	4,64	0,57	1,07	54,0	39,7
3	3,72	0,6	1,22	50,6	43,77

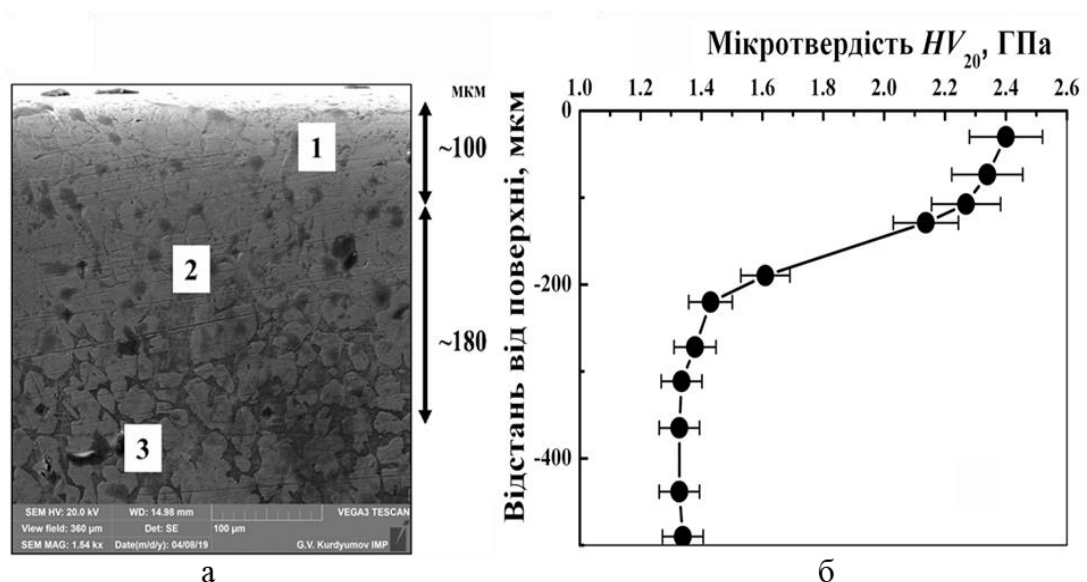


Рисунок 3.8 – СЕМ зображення мікроструктури (а), мікротвердість (б) латуні ЛС59-1 після УЗУО впродовж 100 с в середовищі рідкого азоту

Результати розрахунків розміру областей когерентного розсіяння (ОКР) та величини деформації  $\epsilon$  кристалічної ґратки  $\beta$ -фази в залежності від часу УЗУО в середовищі рідкого азоту наведені на рис. 3.9, а. Як і на залежностях мікротвердості (рис. 3.6, а, крива 1), характеристики пластичності (рис. 3.6, а, крива 2) та перерозподілу фазових складових (рис. 3.6, б) від тривалості обробки на залежностях ОКР і  $\epsilon$  можна виділити дві стадії. Перша стадія (20 с) характеризується швидкою і суттєвою зміною величини відповідних характеристик, після завершення даної стадії настає друга стадія, яка характеризується незначними коливаннями. Причому, на першій стадії спостерігається різке зменшення розміру ОКР (в  $\sim 10$  разів), тоді як ступінь деформації кристалічної ґратки  $\epsilon$  – незначний ( $\sim 10\%$ ), та реєструється лише у  $\beta$ -фазі. Тобто, домінуючим фактором зміцнення на початковій стадії є подрібнення зеренної структури та деформаційне нагартування.

Такий же двох-стадійний характер має залежність зміни залишкових макронапружень (рис. 3.9, б, крива 1) та співвідношення інтенсивностей дифракційних ліній  $I_{(111)}/I_{(200)}$  (рис. 3.9, б, крива 2) в зміцненому приповерхневому шарі від тривалості обробки. Залишкові макронапруження, які визначені за методом  $\sin^2\psi$  для лінії (311)  $\alpha$ -фази, добре узгоджуються із значеннями мікротвердості  $Hv_{50}$  для відповідного часу обробки (рис. 3.6, а). Залишкові напруження стиснення стрімко зростають (до  $-600$  МПа) на перших етапах деформації (після 20 с обробки) та суттєво не змінюються (в межах  $490$  МПа –  $700$  МПа) із збільшенням часу обробки.

Про перерозподіл зерен  $\alpha$ -фази за кристалографічними орієнтаціями з підвищенням частки зерен з орієнтацією  $\{111\}$  свідчить зростання відношення інтенсивностей  $I_{(111)}/I_{(200)}$  з  $3,78$  у вихідному стані до  $4,24$  після обробки. Формування текстурованих поверхневих шарів за умов УЗУО було також зафіксоване на титанових [13] та цирконієвих [48, 49] сплавах. Утворення кристалографічної текстури у ГЦК металах за умов деформації стисненням (в тому числі за багатократного ударного стиснення при УЗУО)

обумовлене полегшеною переорієнтацією площин ковзання  $\{111\}$  перпендикулярно до прикладеної сили. Про текстуроутворення в латуні Л70 (мідний сплав з 30 мас.% цинку) було повідомлено і за умов прокатування за кріогенних температур [50].

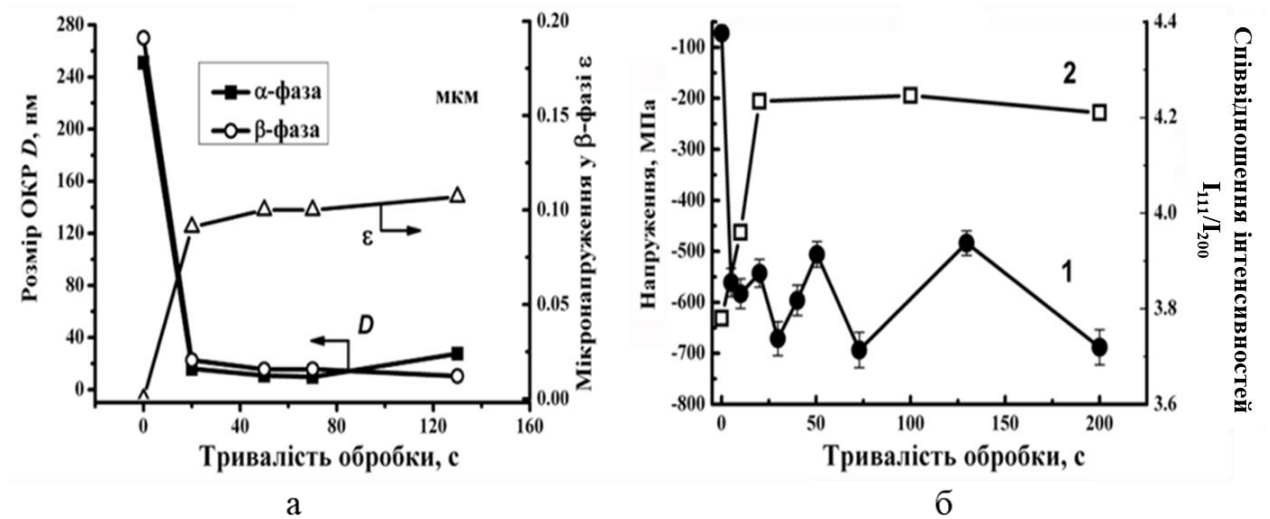


Рисунок 3.9 – Залежності розміру ОКР  $D$ , величини мікроспотворень  $\epsilon$  гратниці  $\beta$ -фази (а) та макронапруження (1) та співвідношення інтенсивностей  $I_{111}/I_{200}$  (2) (б) в латуні ЛС59-1 від часу УЗУО в середовищі рідкого азоту ( $A = 25$  мкм)

Аналіз тонких фольг, виготовлених із зразків, після обробки в середовищі рідкого азоту протягом 50 с, зафіксував формування зсувних смуг у  $\alpha$ -фазі (рис. 3.10, а). Також спостерігається суттєве зростання густини дислокацій у  $\beta$ -фазі та всередині смуг зсуву у  $\alpha$ -фазі. Дислокації утворюють скупчення та дислокаційні субграниці (рис. 3.10, б), які формують комірчасту структуру. В окремих субзернах простежуються нанорозмірні структурні елементи двійникового характеру (шириною  $\sim 20$  нм – 40 нм). Загалом, відбувається суттєве подрібнення елементів структури – розмір утворених комірок становить 50 нм – 200 нм (рис. 3.10, в). Отримані ТЕМ зображення структур з високою щільністю дислокацій, двійників і смуг зсуву узгоджуються з даними щодо мікроструктур, сформованих за умов



динамічної пластичної деформації [37].

Виявлені дефекти кристалічної структури, а також спричинене ними утворення нанорозмірних зерен, можуть відігравати важливу роль в зміцненні поверхневих шарів латуні ЛС59-1 після УЗУО в середовищі рідкого азоту (рис. 3.6, а; рис. 3.8, б).

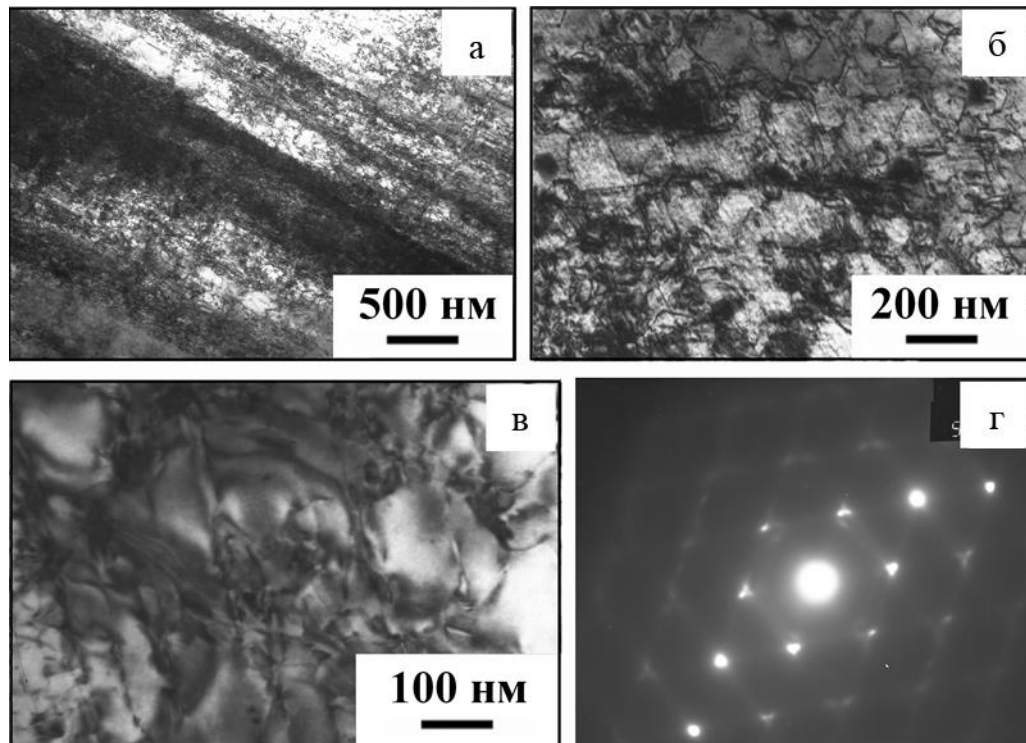


Рисунок 3.10 – ТЕМ зображення (а – в) мікроструктури поверхневого шару латуні ЛС59-1 та картина електронної дифракції (г) з (б) після УЗУО в середовищі рідкого азоту протягом 50 с

Утворена структура має значну релаксаційну стійкість, що може бути пов'язано з наявністю дисперсних частинок другої фази, які також проявляються на картині електронної дифракції (рис. 3.10, г). Такі частинки утворюються в результаті протікання процесів впорядкування/втрати порядку та фазових перетворень в  $\beta$ -фазі [49] за умов обробки в середовищі рідкого азоту. У випадку УЗУО в середовищі рідкого азоту процес фазових перетворень в  $\beta$ -фазі може відбуватись за рахунок охолодження до криогенних температур і наступного періодичного деформаційного

нагрівання та охолодження в процесі обробки. Також можливим є ефект фазового нагартування в зернах  $\alpha$ -фази спричинених змінами об'єму зерен  $\beta$ -, B2, R фаз під час багатократних фазових перетворень, які можуть мати місце при охолодженні від кімнатної до криогенної температури [49].

Із збільшенням тривалості обробки, до 100 с, щільність дислокацій залишається досить високою. Формуються нові дислокаційні субграниці, що сприяє подальшому подрібненню комірчастої структури (рис. 3.11). Елементи структури набувають ще менших розмірів (20 нм – 150 нм). Наявність на картинах електронної дифракції (рис. 3.11, б) суцільних кілець, сформованих розмитими рефlekсами, свідчить, що характерним для такого стану є поява нанокристалічної структури з великокутовими границями, елементи якої мають азимутальні розорієнтування.

Слід зазначити, що формування нанорозмірних структур в латуні ЛС59-1 за умов обробки в середовищі рідкого азоту обумовлене трьома важливими чинниками:

- 1) високою швидкістю деформації (близько  $10^3 \text{ с}^{-1} - 10^4 \text{ с}^{-1}$ );
- 2) температурними умовами поверхневого шару (на рівні температури рідкого азоту);
- 3) високим ступенем деформації поверхневого шару.

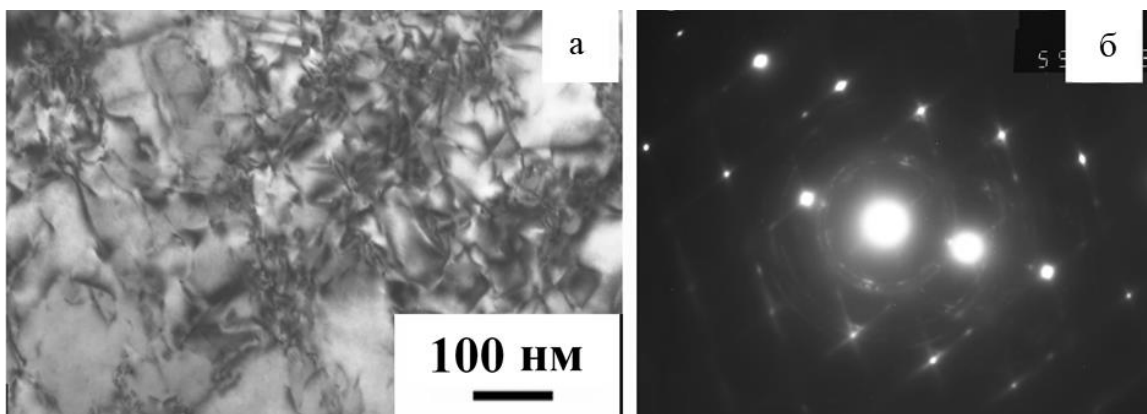


Рисунок 3.11 – ТЕМ зображення (а) мікроструктури поверхневого шару латуні ЛС59-1 та картина електронної дифракції (б) після УЗУО в рідкому азоті впродовж 100 с

Нанорозмірні структурні стани були зареєстровані у поверхневих шарах латуні Cu-37 мас.% Zn під дією піскоструминної поверхневої обробки [36] – деформація з високою швидкістю, а також за кріогенних температур (сплав Cu-32Zn після динамічної пластичної деформації (ДПД) за температури рідкого азоту [37] ).

Як і в даній роботі, було виявлено високу щільність полісистемних нанорозмірних двійників деформації. Вказано, що втрата можливостей ковзання розщеплених дислокацій і двійникування забезпечувати релаксацію високих напружень, обумовлених інтенсивною деформацією, активізує ротаційні моди деформації та, як наслідок, формування аксіальної текстури в поверхневому шарі. Зафіксована у даній роботі поява кристалографічної текстури (рис. 3.9, б) також може бути пояснена проявом ротаційних мод деформації. Раніше, саме дією ротаційних мод деформації впродовж високочастотного ударного оброблення (УЗУО) пояснювалась еволюція структурних станів титанових сплавів [11, 51]. Також слід відзначити наявність великої кількості границь зерен та потрійних стиків границь зерен, які можуть суттєво підвищувати механічні властивості, зокрема мікротвердість поверхневого шару.

До утворення нанорозмірних зерен призводить і динамічна пластична деформація у рідкому азоті [37]. Причому, за різних ступенів деформації домінують або дислокаційна активність (на початкових етапах), або деформація двійникуванням і формування зсувних смуг (за більш високих ступенів деформацій). Згідно [52, 53, 54] кріо-прокатка латуні Cu-30Zn може призводити до формування неоднорідної мікроструктури, яка складається із вихідних зерен міліметрового масштабу, змішаних з ультрадрібними зернами.

Наявність частинок свинцю у досліджуваній латуні ЛС59-1 є бар'єром для переходу напружень до  $\beta$ -фази, а також це впливає на збільшення щільності дислокацій. Наприклад, у роботі [37] показано, що інтенсивна пластична деформація двофазної латуні викликає появу набагато більшої

густини дислокацій та кількості мікродвійників у  $\alpha$ -фазі, ніж в  $\beta$ -фазі, що викликає більш інтенсивне зміцнення та зростання твердості саме  $\alpha$ -фази. В [50] також відзначається, що деформація  $\beta$ -фази обмежена, а нанокристалічна структура та зсувні смуги формуються в  $\alpha$ -фазі. Ці дані цілком узгоджуються з результатами, отриманими в даній роботі.

На рисунках 3.12, 3.13, 3.14 зображено морфологію поверхні латуні ЛС59-1 після УЗУО в різних середовищах: повітрі, рідкому азоті, інертному середовищі.

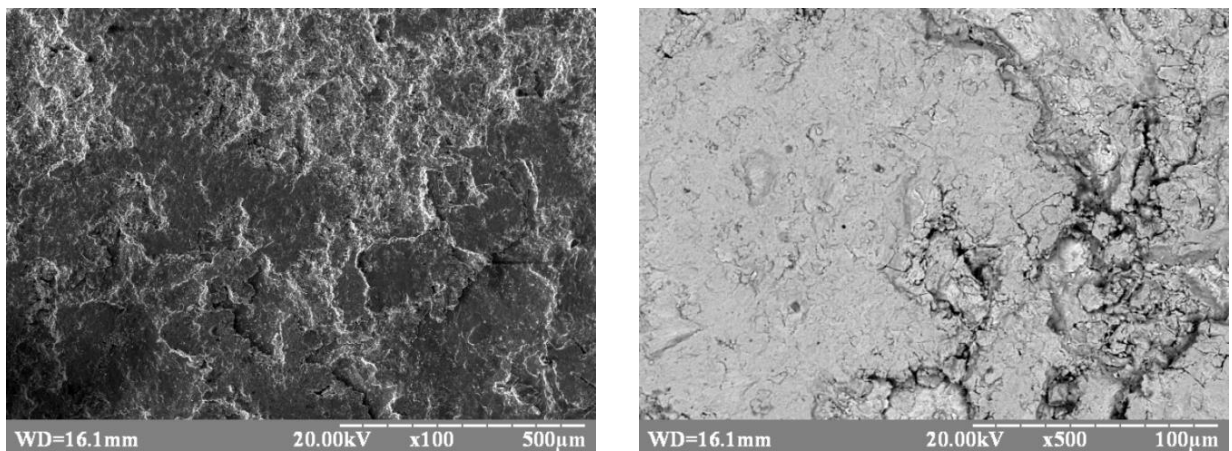


Рисунок 3.12 – Морфологія поверхні латуні ЛС59-1 після УЗУО на повітрі  
( $A = 25\text{мкм}$ ,  $\tau = 50\text{ с}$ ) [38]

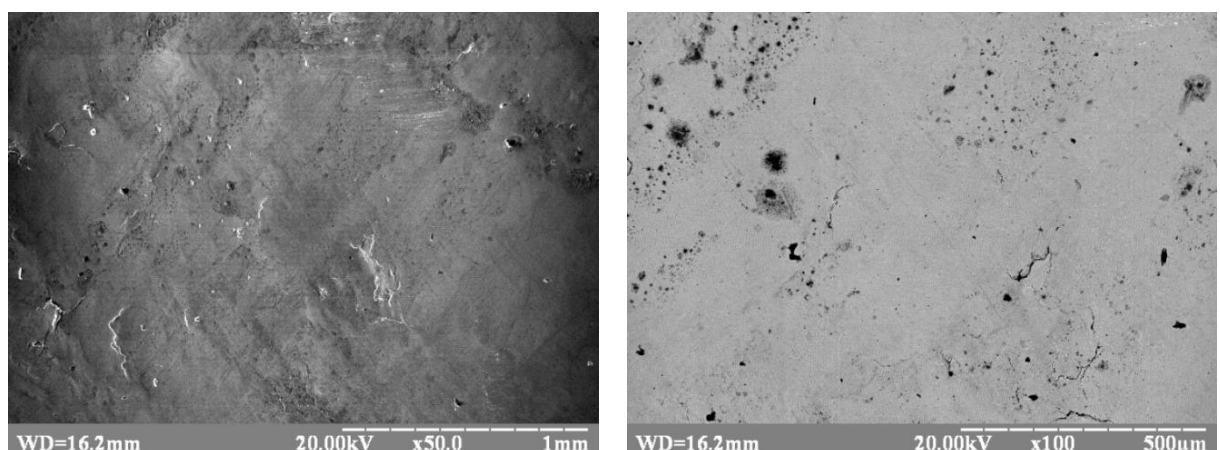
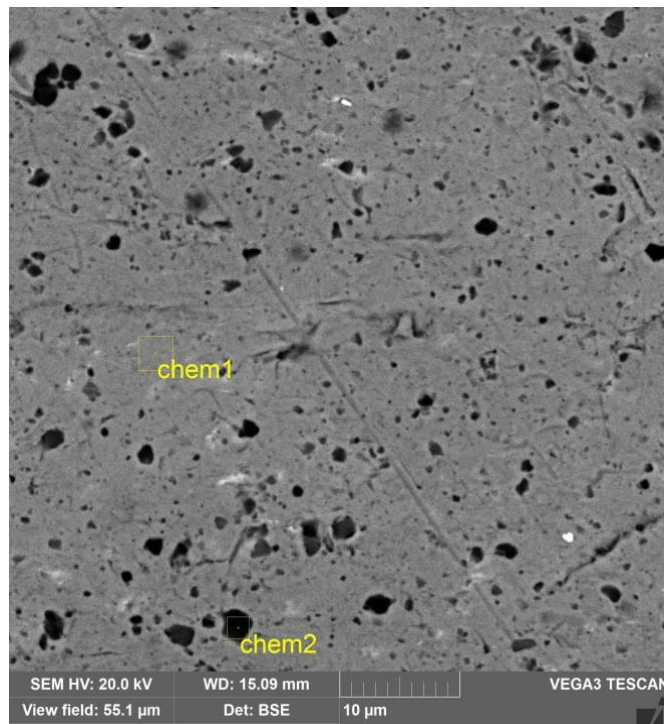


Рисунок 3.13 – Морфологія поверхні латуні ЛС59-1 після УЗУО в  
інертному середовищі ( $A = 25\text{мкм}$ ,  $\tau = 50\text{ с}$ ) [38]



Елемент	Вміст, ат.%	
	1	2
C	20,60	-
N <sub>2</sub>	-	0,00
O <sub>2</sub>	5,41	0,00
Na	5,31	-
Cr	0,01	-
Fe	-	0,13
Cu	38,55	56,97
Zn	29,84	42,70
Pb	0,27	0,19
Sn	0,1	-

Рисунок 3.14 – Морфологія поверхні та відповідний хімічний склад латуні ЛС59-1 після УЗУО в середовищі рідкого азоту ( $A = 25\text{мкм}$ ,  $\tau = 50\text{с}$ ) [39]

### 3.3 Висновки до розділу 3

- 1) показана можливість зростання мікротвердості поверхневих шарів латуні ЛС59-1 до  $\sim 200\%$  в процесі УЗУО в середовищі рідкого азоту. Встановлено зв'язок між механічними властивостями та структурно-фазовими перетвореннями в латуні ЛС59-1;
- 2) зміна механічних властивостей та характеристик структурно-фазового стану зі збільшенням тривалості обробки (ступенем деформації поверхневого шару) має двох-стадійний характер;
- 3) зміцнення на початкових етапах оброблення відбувається за рахунок перебігу процесів накопичення дислокацій у плоских скупченнях, формування мікродвійників і зсувних смуг з високою густиною дислокацій в них, які забезпечують диспергування зеренної структури і зменшення розміру ОКР більш ніж в 10 разів;
- 4) додатковими факторами зміцнення є зміни фазового і хімічного складу поверхневого шару, стискаючі напруження та переорієнтація зерен.

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Мета даного розділу – аналіз шкідливих та небезпечних факторів, за яких виникає небезпека ураження організму або умов, які можуть привести до травмування в процесі обробки поверхні сплаву ЛС59-1 ультразвуковою ударною обробкою в середовищі рідкого азоту, а також розробка заходів, які спрямовані на усунення цих факторів.

У цьому розділі розглянуто засоби охорони праці під час виконання досліджень, які проводились на приладі УЗГ–300.

Для вирішення поставлених завдань необхідно використати наступні виробничі чинники:

- 1) аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів (ШНВФ);
- 2) інженерні рішення для забезпечення безпеки праці в лабораторії;
- 3) розрахунок інженерного рішення;
- 4) вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях.

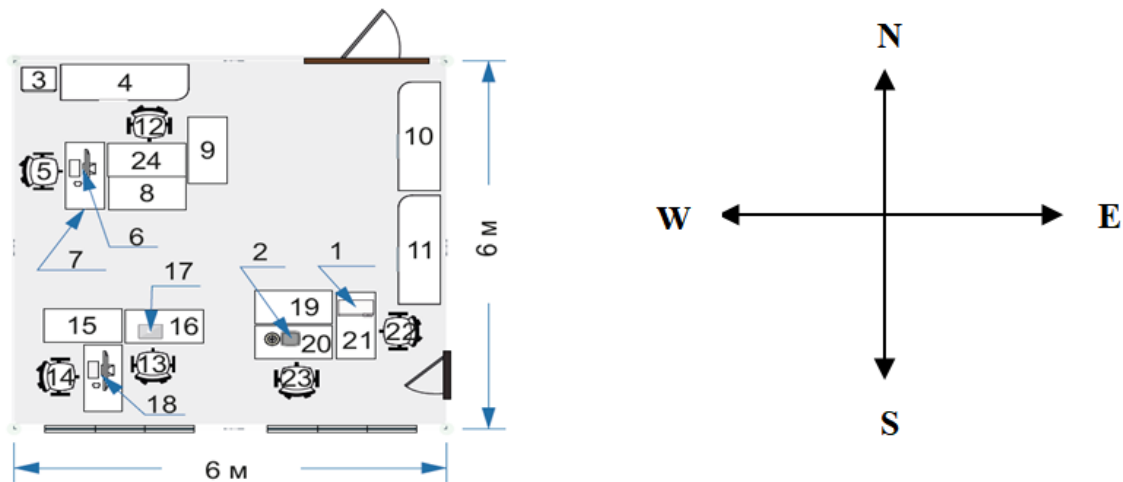
### **4.1 Правові та організаційні основи охорони праці**

Служба охорони праці в КПІ ім. Ігоря Сікорського (в якому виконувалась НДР) підпорядковується ректору М.З. Згуровському. Керівник відділу охорони праці в КПІ ім. Ігоря Сікорського – Е.Г. Луцик. Відповідальна особа, що гарантує дотримання вимог охорони праці на інженерно-фізичному факультеті – П.І. Лобода. На кафедрі фізики металів (5 поверх навчального корпусу № 9) – Є.В. Іващенко. В науково-дослідній лабораторії № 508, в якій проводились наукові дослідження – А.І. Мазур.

## 4.2 Аналіз наявності шкідливих та небезпечних виробничих факторів

### 4.2.1 Мікроклімат

Магістерська дисертація виконувалась на кафедрі фізики металів інженерно-фізичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського в корпусі № 9 на 5 поверсі в кімнаті № 508. Схематичне зображення лабораторії з розташуванням в ній елементів наведено на рис. 4.1.



- 1 – мікротвердомір ПМТ-3; 2 – прилад для УЗУО УЗГ–300; 3 – тумба;  
 4, 10, 11 – книжкова шафа; 7, 8, 9, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 24 – стіл письмовий;  
 5, 12, 13, 14, 22, 23 – стілець; 6, 17, 18 – комп'ютер

Рисунок 4.1 – Схема лабораторії, в якій виконувалась науково-дослідницька робота

Аналізовано розміри лабораторного приміщення:

- 1) розміри кімнати: ширина – 6 м, довжина – 6 м, висота – 2,7 м;
- 2) розміри вікон: ширина – 2,5 м, висота – 2 м.

Лабораторне приміщення № 508, в якому працює три особи має площу  $36 \text{ м}^2$  та об'єм  $97,2 \text{ м}^3$ . Площа, що доводиться на одну особу становить  $12 \text{ м}^2$ , та об'єм  $24,4 \text{ м}^3$ . Тобто, об'єм та площа лабораторії повністю відповідають нормам, відповідно до ДСанПіН 3.3.2-007-98, яка встановлює норми на величину робочого простору, де на робоче місце однієї особи має бути

відведено не менше  $6\text{ м}^2$  та  $20\text{ м}^3$  об'єму [55].

Важливим фактором, також, для нормальної працездатності працівників є: чистота повітря в робочій зоні, освітленість та температура в робочому приміщенні й багато інших чинників. Тому виконання магістерської дисертації супроводжувалось дослідженням мікроклімату в приміщенні лабораторії № 508 [55].

Згідно до «Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99 встановлюються оптимальні та допустимі параметри, а саме: відносна вологість, температура, швидкість руху повітря в робочому приміщенні в залежності від періоду року та категорії важкості робіт [56].

Згідно із ДСН 3.3.6.042-99 умови мікроклімату відносяться до категорії важкості робіт – легка І б. До цієї категорії відносяться легкі фізичні роботи до  $150\text{ Ккал/год}$ , які супроводжуються виникненням деякого рівня фізичних навантажень, що виконуються сидячи або стоячи, та роботи, які пов'язані з ходінням [56]. Розрізняють також категорії робіт за їх важкістю: легка І а, легка І б, середньої важкості ІІ а, середньої важкості ІІ б, важка ІІІ.

Результати вимірювань та нормовані величини параметрів мікроклімату в робочій зоні лабораторії № 508 наведені у таблиці 4.1 та табл. 4.2.

Таблиця 4.1 – Виміряні величини параметрів мікроклімату приміщення

Період року	Вимірювані фактичні величини		
	Температура, °C	Відносна вологість, %	Швидкість руху, м/сек.
Холодний	20	70	0,1
Теплий	23	55	0,2



Таблиця 4.2 – Нормовані величини параметрів мікроклімату згідно до ДСН 3.3.6.042-99 з категорією робіт важкості – легка І а [59]

Період року	Оптимальна температура повітря, °С	Оптимальна відносна вологість, %	Оптимальна швидкість руху, м/сек.
Холодний	21 – 23	60 – 40	0,1
Теплий	22 – 24	60 – 40	0,2

Аналіз виміряних величин дозволяє стверджувати, що фактичні параметри мікроклімату відповідають оптимальним умовам і вимогам санітарних норм.

#### 4.2.2 Повітря робочої зони

Повітря робочої зони в лабораторії може містити шкідливі речовини та пил. Вміст шкідливих речовин та пилу в повітрі робочої зони не має перевищувати гранично допустимі концентрації, що використовуються при проектуванні виробничих будівель, технологічних процесів, обладнання, а також вентиляції. За ГОСТ 12.1.005-88 [57], встановлено гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони виробничих приміщень. Потрапляння в повітря робочої зони шкідливих речовин чи пилу залежить, в свою чергу, від технологічного процесу та сировини, яка використовується.

В лабораторії, де виконувалась магістерська науково-дослідницька робота, не проводились процеси полірування, шліфування або травлення з матеріалами в твердому стані. Щодня проводилось вологе прибирання лабораторії. Всі процеси при ультразвуковій ударній обробці проводились у закритому об'ємі камери установки, тому не було викиду шкідливих речовин у повітря лабораторії.

#### 4.2.3 Шум

Шум – деякий небажаний звук, який може викликати погіршення самопочуття або здоров'я людини. Шум також знижує працездатність, може сприяти отриманню травм, внаслідок підвищення рівня розсіяності та уважності [58].

Магістерська дисертація здійснювалась на приладі для ультразвукової ударної обробки УЗГ–300, яка створювала певний шум в процесі роботи.

Довготривала та надмірна дія шуму викликає порушення здоров'я людини, а саме:

- 1) погіршення пам'яті;
- 2) запаморочення;
- 3) підвищена стомлюваність;
- 4) дратівливість.

Довготривалий, систематичний та надмірний вплив ультразвукових хвиль, безумовно, негативно впливає на організм людини. Викликає порушення нервової, серцево-судинної, ендокринної та слухових систем [58].

Існують такі засоби індивідуального захисту від шуму та ультразвуку:

- 1) протишумні (звукоізолюючі) навушники;
- 2) шоломи;
- 3) костюми;
- 4) звукоізолюючі кабіни;
- 5) акустичні екрани.

Встановлення граничних величин шуму на робочих місцях та в лабораторних приміщеннях забезпечує ДСН 3.3.6.037-99. Цей документ встановлює принципи, щодо певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням для трудової діяльності різних напрямків [59].

Під час роботи ультразвукових установок рівні звукового тиску на робочих місцях повинні відповідати ДСН 3.3.6.037-99. Дозволяється застосовувати установки з електричною потужністю менше

250 Вт і робочою частотою не нижче 44 кГц без засобів захисту від ультразвуку. Робота на приладах, які випромінюють ультразвукові коливання та хвилі повинні виключати можливість безпосереднього контакту людини з ультразвуковими інструментами або деталями, які обробляються. Ультразвукова ударна обробка відбувалась в закритій камері, а сама установка обладнана звукоізолюючим кожухом, покритим гумою, для перешкодження розповсюдження звукових та ультразвукових хвиль у простір лабораторії. В роботі додатково використовувались протишумні навушники та акустичні екрани [58].

#### 4.2.4 Вібрації

Робота за приладом для ультразвукової ударної обробки УЗГ-300 супроводжується певним рівнем вібрації.

Вібрації – механічні коливання пружних тіл або коливальні рухи механічних систем. Загалом вплив вібрацій спричиняє негативну дію на організм людини [58].

Найголовнішим методом захисту від вібрації, який використовувався в даній роботі є їх гасіння, яке здійснювалось ізоляцією джерел коливань від опорних поверхонь за допомогою гумових, пружинних або комбінованих ізоляторів [58].

Нормуються параметри вібрації відповідно до вимог ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій та ГОСТ 12.1.012-90 «Вибрационная безопасность. Общие требования» [60].

Установка УЗГ-300 працює в ультразвуковому діапазоні. Обробка зразків здійснювалась від 5 с до 200 с. Схема проведення УЗУО на рисунку 2.1. Вибір параметрів УЗУО описаний у підрозділі 2.2: «Методика та режими ультразвукової ударної обробки».

Вплив від вібрацій не зазнається, так як немає контакту людини з установкою під час обробки. З метою профілактики шкідливого впливу ультразвуку, використовувалося малопотужне ультразвукове обладнання.

#### 4.2.5 Електробезпека

Елетронебезпека – системи організаційних та технічних заходів та засобів, які в свою чергу забезпечують захист людини від шкідливої та небезпечної дії електричного струму, електричної дуги, електричного поля і статичної електрики.

Згідно діючим правилам побудови та розміщення електроустановок ДНАОП 0.00-1.32-01 лабораторія № 508, де здійснювалась науково-дослідницька робота, за небезпекою ураження електричним струмом відносять до приміщення без підвищеної небезпеки (сухі приміщення з температурою 18 °С – 25 °С та струмонепровідною підлогою), відповідно до джерела [61].

Електричні установки, що були використані при виконанні магістерської дисертації живилися від напруги 220 В (комп'ютери, орг. техніка, ПМТ–3, УЗГ–300) зі змінним струмом.

Головні чинники, що впливають на тяжкість ураження людини електричним струмом, поділяються на три групи: електричного характеру, неелектричного характеру, чинники виробничого середовища [58].

Основні характеристики електричного характеру:

- 1) величина струму, що проходить через людину;
- 2) напруга;
- 3) опір тіла;
- 4) рід і частота струму.

Основні чинни неелектричного характеру:

- 1) шлях струму через людину;
- 2) індивідуальні особливості;
- 3) стан організму людини;
- 4) дія струму.

Чинники виробничого характеру [58]:

- 1) умови оточуючого середовища;
- 2) схема включення людини в електричну мережу.

Причини ураження електричним струмом:

- 1) пошкодження ізоляції, як наслідок, доступність людини до струмоведучих частин обладнання, відповідно;
- 2) поява напруги на відімкнених струмоведучих частинах, внаслідок помилкового ввімкнення установки;
- 3) невиконання або неправильне виконання вимог техніки електробезпеки, неуважність при роботі.

Причинами ураження електричним струмом під час виконання трудового процесу з електрообладнанням є:

- 1) випадковий дотик до струмоведучих частин, що перебувають під напругою, через відсутність засобів недоступності або безвідповідальне відношення до безпеки персоналу;
- 2) дотик до неструмоведучих частин електроприладів, які випадково потрапили під напругу через ушкодження ізоляції чи іншого ушкодження;
- 3) потрапляння під напругу під час проведення ремонтних робіт на відключених електроприладах через помилкове їх включення.

Гранично допустимий струм через людину при нормальному (неаварійному) режимі роботи електроустановки не повинен перевищувати 0,3 мА для перемінного струму і 1 мА для постійного [62].

Фактори тяжкості ураження електричним струмом [62]:

- 1) стан шкіряного шару (порізи, подряпини, зволоження, збільшене потовиділення, забруднення шкіряного шару можуть призвести до значного зменшення загального опору тіла людини електричному струму);
- 2) параметри електричного струму (постійний чи змінний струм, величина електричного струму).

Тим менша небезпека для організму людини, чим тривалість впливу струму менша. За тривалого впливу струму опір тіла людини падає і струм в свою чергу зростає до значень, які здатні викликати зупинку дихання або фібриляцію серця. Підвищена вологість повітря, струмовідний пил та хімічно активні домішки знижують опір ізоляції електроустановки, сприяють

переходу напруги на неструмовідні частини установки, коротким замиканням тощо і, таким чином, підвищують небезпеку електротравм [63].

Проходження електричного струму організмом людини є складним процесом, що супроводжується значним спектром фізико-біологічних та хімічних реакцій, основними з яких є термічна, електролітична, механічна та біологічна. Термічна реакція тканин організму людини виникає внаслідок перетворення електричної енергії в теплову. Електролітична дія електричного струму на живі тканини полягає в розкладанні внутрішньоклітинної органічної рідини на іони. Механічна реакція організму людини на протікання електричного струму виявляється у вигляді електродинамічного ефекту, який полягає, наприклад, у різкому скороченні м'язових тканин. Біологічна реакція організму людини на електричний струм формується в результаті його дії на внутрішні біоелектричні процеси, в подразненні живих тканин [62].

В лабораторії, де були проведені дослідження, виконане захисне заземлення корпусів електроустаткування та приладів. Розташування робочих місць виконано таким чином, що виключає можливість одночасного доторкання до корпусів, електроустаткування і приладів, відповідно до джерела [63].

### **4.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці**

#### **4.3.1 Організація робочого місця**

Виробничі приміщення, організації і обладнання робочих місць наведені в НПАОП 0.00-7.15-18. Організація робочого місця користувача персонального комп'ютера має забезпечувати підтримання оптимальної робочої пози із наступними ергономічними характеристиками [64, 65].

- 1) зап'ястя зігнуті під кутом не більше  $15^{\circ}$  –  $20^{\circ}$  відносно вертикальної площини;
- 2) лікті зігнуті під кутом  $70^{\circ}$  –  $90^{\circ}$  до вертикальної площини;
- 3) передпліччя встановлені у вертикальному положенні;

- 4) стегна знаходяться в горизонтальній площині;
- 5) ступні ніг розміщені на підлозі або на підставці для ніг.

Висота робочої поверхні стола для роботи у сидячому положенні в межах 680 мм – 800 мм, а ширина забезпечує здатність працівника до виконання необхідних операцій в зоні досяжності моторного поля. Рекомендовані параметри столу для роботи: висота – 725 мм, ширина робочої зони в межах від 600 мм до 1400 мм, довжина від 800 мм до 1000 мм [64].

#### 4.3.2 Вентиляція

Відповідно до ДСТУ 2388-94 місцева вентиляція має забезпечити вилучення забрудненого повітря із зон, де зосереджено виділення шкідливих речовин. В інших випадках використовується загальнообмінна вентиляція. Вона має бути виконана в комбінації з місцевою вентиляцією, яка розрахована на видалення з виробничого приміщення шкідливих речовин, нелокалізованих місцевими витяжними пристроями [65].

### 4.4 Розрахунок інженерного рішення

#### 4.4.1 Розрахунок вентиляції

Розрахунок об'єму повітря, яке потрібно видалити місцевою вентиляцією  $L_m$ , визначається, виходячи з заданої швидкості всмоктування біля джерела виділення шкідливих речовин, характеристики спектру швидкостей всмоктування для певної конструкції всмоктувального отвору та наявності поверхонь, що огорожують зону всмоктування. У цьому випадку [66, 67]:

$$L_m = 3600 \cdot F_0 \cdot V_0, \quad (4.1)$$

де  $F_0$  – площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача,  $m^2$ ;

$V_0$  – швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі,  $m/s$ .

Площу  $F_0$  знаходять конструктивними особливостями технологічного обладнання й обраного витяжного пристрою [66, 67]. Значення  $V_0$  розраховується на підставі забезпечення заданої швидкості повітря  $V_x = (0,5 \text{ м/с})$  у зоні обробки на відстані  $x$  від центру всмоктуючого отвору [66, 67]:

$$V_0 = 16 \cdot V_x \cdot (x/d)^2, \quad (4.2)$$

де  $d$  – діаметр отвору, м;

$x$  – відстань до робочої поверхні, м.

На рис. 4.2 наведено принципову схему місцевої вентиляції необхідної для проведення УЗУО.

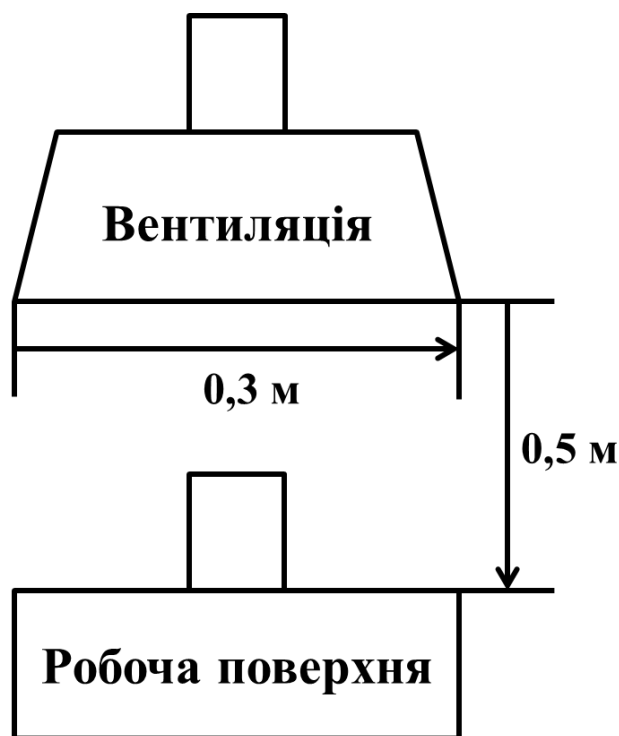


Рисунок 4.2 – Схема місцевої вентиляції

В результаті розрахунків встановлено, що швидкість всмоктування повітря у прорізі  $V_0$  повинна бути 22 м/с, а об'єм повітря, що має бути видалене місцевою вентиляцією  $L_m = 2376 \text{ м}^3/\text{год}$ .



#### **4.5 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях**

Надзвичайна ситуація – стан на окремій території або суб'єкті господарювання на ній або водному об'єкті, що характеризується порушенням нормальних умов життєдіяльності населення, спричинена катастрофою, аварією, пожежею, стихійним лихом, епідемією, епізоотією, епіфітотією, застосуванням засобів ураження або іншою небезпечною подією, що призвела (може призвести) до виникнення загрози життю або здоров'ю населення, великої кількості загиблих і постраждалих, завдання значних матеріальних збитків, а також до неможливості проживання населення на такій території чи об'єкті, провадження на ній господарської діяльності [68].

Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій – комплекс правових, соціально-економічних, політичних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів, спрямованих на регулювання техногенної та природної безпеки, проведення оцінки рівнів ризику, завчасне реагування на загрозу виникнення надзвичайної ситуації на основі даних моніторингу, експертизи, досліджень та прогнозів щодо можливого перебігу подій з метою недопущення їх переростання у надзвичайну ситуацію або пом'якшення її можливих наслідків [68].

Під час виконання науково-дослідницької роботи можливе виникнення наступних надзвичайних ситуацій: пожежі, землетрусу, вибуху, аварії на електроенергетичних системах, руйнування будівлі.

##### **4.5.1 Пожежна безпека**

Категорія пожежної безпеки приміщення (будівлі, споруди) – це класифікаційна характеристика пожежної безпеки об'єкта, що визначається кількістю і пожежонебезпечними властивостями речовин і матеріалів, які знаходяться (обертаються) в них з урахуванням особливостей технологічних процесів, розміщених в них виробництв [58].

Відповідно до НАПБ Б.03.002-2007, приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою поділяються на п'ять категорій (А, Б, В, Г, Д) [63].

Можна зробити висновок, що приміщення лабораторії № 508-9 за пожежонебезпекою відноситься до категорії «Г» (в лабораторії є негорючі речовини та матеріали в гарячому, розжареному або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор, полум'я; горючі гази, спалимі рідини, тверді речовини, які спалюються або утилізуються як паливо) [58]. Найбільш пожежонебезпечне місце у лабораторії – місце в якому прокладена електропроводка. Загоряння в приміщенні може виникнути внаслідок короткого замикання в електропроводці [63]. План евакуації із лабораторії у випадку виникнення пожежі наведено на рис. 4.3.



Рисунок 4.3 – План евакуації з лабораторії № 508

З засобів пожежогасіння у лабораторії наявні вогнегасники ОУБ-2. Засоби виявлення та оповіщення про пожежу – автоматичні датчики сигналізатори типу ДТП. Засоби комунікації та оповіщення співробітників про пожежну ситуацію – внутрішньо-службовий зв'язок. На випадок пожежної ситуації є план евакуації працівників з лабораторії № 508.

#### 4.5.2 Безпека в аварійних ситуаціях

Якщо відбувся пробій електричної напруги на корпус приладу УЗГ–300 потрібно, в першу чергу вимкнути рубильник та довести до відома про це майстра або керівника ділянки.

Якщо хтось потрапив під напругу, необхідно вимкнути прилад УЗГ–300 від мережі, покласти потерпілого на дерев'яний настил, підклавши під голову ватник, викликати лікаря за номером 103 і, якщо це необхідно, зробити потерпілому штучне дихання.

Якщо відбулось займання приладу потрібно вимкнути рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника.

#### 4.6 Висновки до розділу 4

Було проведено аналіз параметрів робочого приміщення, які мають безпосередній вплив на здоров'я, життя та працездатність людини: мікроклімат, шум, вібрація, електробезпека, пожежна безпека. Всі задані параметри задовільняють вимогам санітарних норм.

## 5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

### 5.1 Опис ідеї стартап-проекту

Ідея проекту спрямована на розробку технології зміцнення та підвищення експлуатаційних й конструкційних властивостей поверхневих шарів латуні ЛС59-1 за допомогою ультразвукової ударної обробки в середовищі рідкого азоту.

Потенційний товар даного стартап проекту – технологія зміцнення поверхневих шарів латуні ЛС59-1 (склад (ваг. %): Cu – 58,9 %, Zn – 39,6 %, Pb – 1,04 %).

Ультразвукова обробка в середовищі рідкого азоту стрімко розвивається у всьому світі. Вона має ряд значних переваг серед своїх аналогів, такі як: вартість обробки, вартість обладнання; ефективність обробки: дозволяє отримати кращі конструкційні та експлуатаційні характеристики матеріалу після його обробки.

Численні дослідження показали, що саме кріо-УЗУО дозволяє суттєво підвищити втомну міцність зразків і елементів конструкцій відповідальних споруд та несучих конструкцій, що відіграє дуже важливу роль у багатьох галузях виробництва.

Сплав ЛС59-1 є найбільш популярним серед латуней, які оброблюються тиском. Сплав зберігає хороші конструкційні властивості навіть при низьких температурах. Пластичність зберігає навіть при зниженні температур до гелієвих. При середніх температурах (200 °C – 600 °C) в сплаві спостерігається явище крихкості в зв'язку з багатофазною структурою матеріалу. Ударна в'язкість зменшується з підвищенням температури.

Оскільки, латунь ЛС59-1 має багатофазну структуру, то вироби з неї відрізняються особливою підвищеною крихкістю. Деталі з цього сплаву, на яких виконані поверхневі надрізи, не можна використовувати в якості несучих елементів, так як при значному тиску вони можуть зламатись. Крім того, підвищена крихкість цієї латуні приводить до того, що при впливі

ударних навантажень, поверхня виробів з цього матеріалу може покриватись тріщинами, що не дозволяє виконати їх обробку за допомогою такої технологічної операції, як ковка.

Завдяки таким чинникам як: висока твердість, невисока вартість, відмінна оброблюваність на верстатах, корозійна стійкість і антифрикційні властивості, латунь ЛС59-1 успішно використовується у всіх видах виробництва. З сплаву масово випускають різні заготовки. З нього виробляють: втулки, шестерні, поковки, колеса, труби, кріплення. Також зі сплаву виготовляються деталі автомобілів. Вони не деформуються і не стираються під час експлуатації.

На даний момент існує мало фахових публікацій за темою, що вказує на наукову новизну та підкреслює необхідність проведення досліджень з метою підвищення механічних характеристик латуні ЛС59-1.

Опис ідеї стартап-проекту наведений у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту розробки технології зміцнення поверхневих шарів сплаву ЛС59-1 за допомогою ультразвукової ударної обробки в середовищі рідкого азоту, для значного підвищення експлуатаційних та конструкційних характеристик [69]

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди користувача
Зміцнення поверхневих шарів сплаву ЛС59-1 для підвищення експлуатаційних та конструкційних характеристик	1. Автомобілебудування (шестерні)	Зміцнення поверхні деталей зі сплаву ЛС59-1, можливість обробки готових деталей різної форми та розмірів на станках, висока корозійна стійкість, відмінні антифрикційні властивості, невелика собівартість
	2. Верстатобудівництво (направляючі для руху кареток станків та ін.)	
	3. Кораблебудування	

## 5.2 Розрахунок собівартості проведення дослідження

Планова собівартість виконання дослідження показує рівень матеріальних та трудових витрат. Обчислення собівартості дослідження здійснювалось за наступними калькуляційними статтями [70]:

- 1) витрати на основні матеріали;
- 2) витрати на спеціальне обладнання, що необхідно для проведення дослідження;
- 3) заробітня платня персоналу;
- 4) єдиний соціальний внесок;
- 5) витрати на службові відрядження;
- 6) витрати на послуги сторонніх організацій;
- 7) інші невраховані прямі витрати по темі;
- 8) накладні витрати.

### 5.2.1 Витрати на основні матеріали

Витрати на основні та допоміжні матеріали, що необхідні для проведення експерименту, проводяться виходячи із вартості та необхідної кількості матеріалів. Дані про матеріали, які необхідні для проведення дослідження наведені в табл. 5.2 [70].

Таблиця 5.2 – Вартість основних матеріалів

Найменування матеріалів	Одиниця вимірювання	Кількість	Ціна, грн.	Сума, грн.
1. Зразки ЛС59-1	шт.	20	3	60
2. Шліфувальний папір	шт.	5	10	50
3. Кислота $\text{FeCl}_3$	літр	0,5	70	35
4. Рідкий азот	літр	5	20	100
Всього				245

Транспортно-заготівельні витрати становлять 10 % від ринкової вартості основних матеріалів:  $245 \times 0,1 = 24,5$  грн [70].

Повна сума витрат на матеріали ( $C_M$ ):  $245 + 24,5 = 269,5$  грн.

### 5.2.2 Витрати на спеціальне обладнання

Дослідження були виконані на наявному обладнанні. Утримання, а також експлуатацію обладнання відносять до накладних витрат [70].

### 5.2.3 Основна та додаткова зарплата виконавців досліджень

Витрати за цією статтею складаються з основного та додаткового фонду заробітної плати [70].

Денна заробітна плата виконавців (табл. 5.3) визначається, виходячи з місячних окладів при умові, що середня кількість робочих днів в місяць – 22.

Таблиця 5.3 – Розрахунок денної заробітної платні виконавців теми

Виконавець	Місячний оклад, грн	Денна ЗП, грн.
Провідний науковий співробітник	9944	452
Старший науковий співробітник	5549	252
Інженер	4184	190
Технік	3406	155

Трудовісткість окремих етапів виконання магістерської науково-дослідницької роботи наведено в таблиці 5.4.

Величина прямого фонду заробітної плати виконавців (ПФЗП) обчислюється як сума добутків трудовісткості і денної заробітної плати кожного з них [70]:

$$\text{ПФЗП} = 14 \times 452 + 58 \times 252 + 37 \times 190 + 25 \times 155 = 31849 \text{ грн.}$$

Додатковим фондом заробітної платні (ДФЗП) є 30 % від прямого фонду [70]:  $\text{ДФЗП} = 31849 \times 0,3 = 9555,7$  грн.

Сума прямого та додаткового фондів заробітної платні [70]:

$\text{ПФЗ} + \text{ДФЗП} = 31849 + 9555,7 = 41404,7$  грн.

Таблиця 5.4 – Трудомісткість різних етапів виконання магістерської науково- дослідницької роботи

Макроетапи НДР	Трудомісткість, люд.-дні			
	Провідний науковий співробітник	Старший науковий співробітник	Інженер	Технік
1	2	3	4	5
1.Постановка задачі та визначення напрямів дослідження	2	3	—	—
2. Аналіз фахових публікацій за темою	—	10	—	—
3. Розробка методики проведення досліджень за темою	3	6	8	—
4.Підготування зразків	—	—	5	4
5.Підготовка обладнання	—	6	3	5
6. Проведення експериментів	—	10	8	7
7.Обробка експериментальних результатів	—	10	7	—
8.Обговорення результатів	5	5	5	—
9.Оформлення результатів	4	8	3	—
Разом	14	58	37	25



#### 5.2.4 Єдиний соціальний внесок

Відрахування в єдиний соціальний внесок від прямого та додаткового фондів заробітної плати становить 22 % [70].

Єдиний соціальний внесок:

$$V_c = (\text{ПФЗП} + \text{ДФЗП}) \times 0,22 = 41404,7 \times 0,22 = 9109 \text{ грн.}$$

#### 5.2.5 Витрати на службові відрядження

Впродовж дослідження не було службових відряджень.

#### 5.2.6 Витрати на послуги сторонніх організацій

Впродовж дослідження послуги сторонніх організацій не були необхідними.

#### 5.2.7 Інші прямі невраховані витрати

Інші прямі невраховані витрати становлять 10 % від суми витрат на заробітну плату, суми відрахувань до єдиного соціального внеску, витрат на матеріали [70]:  $P_n = (41404,7 + 9109 + 269,5) \times 0,1 = 5077,95 \text{ грн.}$

#### 5.2.8 Накладні витрати

Величиною накладних витрат є 20 % від планової суми прямих витрат на виконання науково-дослідницької роботи [70]:

$$H_b = 0,2 \times (5077,95 + 9109 + 31849 + 9555,7) = 11118,33 \text{ грн.}$$

#### 5.2.9 Планова кошторисна вартість дослідження

Проведені розрахунки дають змогу визначити загальну планову кошторисну вартість виконання дослідження [70]. Плановий кошторис витрат за темою дослідження наведено у табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Планова кошторисна вартість дослідження

Назви калькуляційних статей	Позначення	Сума		Примітки
		грн.	%	
Пряма та додаткова заробітна плата персоналу	З <sub>пд</sub>	41404,7	61,84	За розрахунками
Єдиний соціальний внесок	В <sub>с</sub>	9109	13,6	22 % від заробітної плати
Матеріали для НДР	С <sub>м</sub>	245	0,36	За розрахунками
Спеціальне обладнання	С <sub>об</sub>	—	—	—
Витрати на службові відрядження	С <sub>в</sub>	—	—	—
Роботи та послуги сторонніх організацій	С <sub>і</sub>	—	—	—
Інші прямі невраховані витрати по темі	П <sub>н</sub>	5077,95	7,58	10 % від врахованих прямих витрат
Накладні витрати	Н <sub>в</sub>	11118,33	16,6	20 % від основної заробітної плати
Разом		66954,98	100	—

В таблиці 5.6 наведено сильні, слабкі та нейтральні сторони проекту.

Таблиця 5.6 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту розробки технології зміцнення поверхневих шарів латуні ЛС59-1 за допомогою ультразвукової ударної обробки середовищі рідкого азоту, для суттєвого підвищення експлуатаційних та конструкційних характеристик [69]

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні товари/концепції конкурентів			
		Спосіб зміцнення			
		Наш проект	Конкурент 1 Вібраційний наклеп	Конкурент 2 Метод механічного легування	Конкурент 3 Метод лазерного легування
1	2	3	4	5	6
1	Собівартість обробки сплаву	66954 грн.	71248 грн.	88328 грн.	98159 грн.
		S	W	W	W

Продовження таблиці 5.6

1	2	3	4	5	6
2	Вартість експлуатації (споживання енергії)	Стандартна	Стандартна	Стандартна	Стандартна
		N	N	N	W
3	Витратні матеріали під час обробки	Необхідні	Необхідні	Необхідні	Необхідні
		S	S	S	S
4	Вартість установки	Мінімальна	Висока	Висока	Висока
		S	W	W	W
5	Екологічність (обсяг відходів)	Немає	Витратні матеріали	Витратні матеріали	Витратні матеріали
		S	W	W	W
6	Тривалість обробки	Мала	Середня	Середня	Середня
		S	N	N	N
7	Обробка готових виробів	Можливо	Можливо	Можливо	Можливо
		N	N	N	N
8	Обробка деталей різної форми	Можливо	Ні	Ні	Можливо
		N	W	W	N

В таблиці 5.7 наведено інші існуючі технології УЗУО в інших середовищах або з використанням різних бойків.

Таблиця 5.7 – Технологічна здійсненність ідеї проекту розробки технології зміцнення поверхневих шарів за допомогою ультразвукової ударної обробки латуні ЛС59-1, в середовищі рідкого азоту, для суттєвого підвищення експлуатаційних та конструкційних характеристик [69]

Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Технологія 1 (УЗУО вібраційним наклепом кульками)	Технологія існує	Доступна
Технологія 2 (УЗУО бойком з армко-заліза)	Технологія існує	Доступна
Технологія 3 (УЗУО в різних середовищах)	Технологія існує	Доступна

За результатами даних таблиці 5.8 можна стверджувати, що ринок є не цілком привабливим для входження за попереднім оцінюванням.

Таблиця 5.8 – Обсяги виробництва легкових автомобілів в Україні (шт.)

Рік	ПрАТ «ЗАЗ»	Корпорація «Богдан»	КрАСЗ	ПрАТ «Єврокар»
2008	252476	87328	25036	35892
2009	43958	14386	3738	3564
2010	42266	19190	6341	7464
2011	59360	20240	6329	11656
2012	39917	12034	3180	14556
2013	19257	5958	9049	11494
2014	12749	1999	7514	3649
2015	3624	0	Закриття	2030
2016	403	0	-	3937
2017	1151	0	-	6145

У таблицях 5.9 – 5.10 представлено характеристику потенційних клієнтів та фактори загроз стартап-проекту.

Таблиця 5.9 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту [69]

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	2	3
1	Кількість головних гравців, од	Є три основні технології-аналоги: 1) Метод вібраційного наклепу 2) Метод механічного легування 3) Метод лазерного легування

Продовження таблиці 5.9

1	2	3
2	Загальний обсяг продаж, ум.од, 2018 рік	2,5 тис. шт.
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Є
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку)	> 1

Таблиця 5.10 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Виготовлення деталей для автомобілів	Юридичні особи (компанії), які виготовляють різноманітні деталі та проводять їх обробку: - ПрАТ «ЗАЗ»; - Корпорація «Богдан»; - КрАСЗ; - ПрАТ «Єврокар»;	Стандарти, Технічні регламенти, Специфікації, Обсяги закупок, Умови експлуатації	Собівартість Час експлуатації Вимоги до складу Рівномірна обробка поверхні
2	Обробка деталей для їх більшої довговічності			

Попередня проведена оцінка ринку дозволяє стверджувати, що входження на ринок з даним стартап-проектом є цілком можливим. Аналітики відзначають зростання інвестицій у машинобудівну галузь України, починаючи з 2020 року.

В таблиці 5.11 наведено основні фактори загроз стартап-проекту.

Таблиця 5.11 – Фактори загроз стартап-проекту [69]

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Нестабільність економічної та політичної ситуації в країні	Зменшення фінансування та попиту	Застосування короткострокових стратегій
		Відмова від інвестицій	Приймання участі у програмах, в тому числі міжнародних, для того, щоб залучити додаткові інвестиції

В таблицях 5.12 – 5.13 описано фактори можливостей стартап-проекту та ступеневий аналіз конкуренції на ринку.

Таблиця 5.12 – Фактори можливостей стартап-проекту [69]

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зниження собівартості товару	Зменшення витратних матеріалів	Зменшення ціни обробки та підвищення обсягів промислового виробництва
2	Збільшення попиту на сплав ЛС59-1	Підвищення попиту на технологію УЗУО	Підвищення обсягу продажу

Таблиця 5.13 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку стартап-проекту [69]

№ п/п	Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1	2	3	4
1	Міжнародна	Зменшення витратних матеріалів	Підвищення обсягів виробництва
2	Цінова	Підвищення ціни конкурентів	Зменшення власної ціни за рахунок дешевого процесу обробки і збільшення обсягів продажу

Продовження таблиці 5.13

1	2	3	4
3	Олігополія	Конкуренти намагаються уникнути цінової боротьби, або неможливі переваги об'ємів продажів	Виділення ринкових сегментів, а також вдосконалення технологічних процесів й незначні новації

В таблиці 5.14 представлено SWOT-аналіз стартап-проекту.

Таблиця 5.14 – SWOT – аналіз стартап-проекту [69]

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
1	2
Внутрішні переваги стартап-проекту: технологія УЗУО проводиться на готових виробках, конструкціях і деталях різної геометричної форми. Можливість проведення її в різних локальних областях виробу, у складних місцях, при цьому досягати значного підвищення механічних та конструкційних властивостей, корозійну стійкість. При цьому використовуються недорогі витратні матеріали. З вищесказаного можна зробити висновок, що промислове застосування даного способу є економічно ефективнішим.	Внутрішні недоліки стартап-проекту: потрібно провести додаткові дослідження, а саме інших сплавів та сплавів системи Cu-Zn. Значення мікротвердості поверхневих шарів після УЗУО в середовищі рідкого азоту може мати певні коливання, й можна зробити висновок, що на поверхні існують як і істотно зміцнені ділянки, так і ділянки, в яких значення мікротвердості нижче.
Можливості:	Загрози:
Стартап-ідея спрямована на розробку способу технології височастотного ударного оброблення поверхневих шарів сплаву ЛС59-1 в середовищі рідкого азоту, для суттєвого підвищення механічних та експлуатаційних характеристик. Технологія матиме попит застосування в промисловості, у тому числі й за умов знакозмінних деформацій, високого тиску чи температури.	Залучення інвестицій у галузі виробництва, де застосовується УЗУО в середовищі рідкого азоту.

### **5.3 Висновки до розділу 5**

Була проведена оцінка ринкових можливостей стартап-проекту «розробка технології зміцнення поверхневих шарів латуні ЛС59-1 після ультразвукової ударної обробки в середовищі рідкого азоту». Впровадження проекту є перспективним, незважаючи на зменшення потужностей вітчизняного виробництва. Показано переваги існуючої технології над конкурентами, що дасть в майбутньому можливості для інвестування у дану технологію та її вдосконалення.



## ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано літературні дані за темою та доведено її актуальність. Детально описано методики, та підтверджено її актуальність.

2. Описано обрані експериментальні методи, які дають змогу повністю оцінити фазовий склад, морфологію, структуру поверхневих шарів латуні ЛС59-1 після УЗУО в середовищі рідкого азоту.

3. Показана можливість значного підвищення мікротвердості поверхневих шарів латуні ЛС59-1 до  $\sim 200\%$  інтенсивною пластичною деформацією за допомогою УЗУО в середовищі рідкого азоту. Встановлено зв'язок між механічними властивостями та структурно-фазовим станом латуні ЛС59-1.

4. Показано, що зміна механічних властивостей поверхневого шару та характеристик структурно-фазового стану із зростанням часу оброблення кріогенною УЗУО (ступенем деформації поверхневого шару) має двох-стадійний характер: перша швидкоплинна стадія (тривалість  $\sim 20$  с) суттєвої зміни величини відповідних характеристик змінюється стадією насичення, що характеризується незначними коливаннями.

5. Показано, що зміцнення на початкових етапах обробки відбувається за рахунок перебігу процесів накопичення дислокацій в плоских скупченнях, формування мікродвійників і зсувних смуг з високою густиною дислокацій в них, які забезпечують диспергування зеренної структури і зменшення розміру ОКР більш ніж в 10 разів.

6. Виявлено, що додатковими чинниками зміцнення є зміни фазового і хімічного складу поверхневого шару, а також формування напружень стиснення та переорієнтація зерен у ньому.

7. Було проведено оцінку ринкових можливостей та розраховано собівартість стартап-проекту «розробка технології зміцнення поверхневих шарів латуні ЛС59-1 після ультразвукової ударної обробки в середовищі

рідкого азоту».

8. Було проведено аналіз параметрів робочого приміщення, які мають безпосередній вплив на здоров'я, життя та працездатність людини: мікроклімат, шум, вібрація, електробезпека, пожежна безпека. Всі задані параметри задовільняють вимоги санітарних норм.

## CONCLUSIONS

1. Literature data on the topic is analyzed and its relevance is proved. The methodology is described in detail and its relevance is confirmed.
2. The methods used in the work were described in detail as well.
3. The possibility of increasing the microhardness of the surface layers' CuZb40Pb1 brass to ~ 200% by intensive plastic deformation with the help of high-frequency impact treatment in liquid nitrogen is shown. The correlation between mechanical properties (microhardness  $H_V$  and plasticity characteristic  $\delta_H$ ) and structural-phase state of brass CuZn40Pb1 was established.
4. It is also shown that the change of the mechanical properties of the surface layer and the of the structure-phase state's characteristics at the increasing time of treatment with cryogenic shock treatment (degree of the surface layer deformation) is two-stage in nature: characterized by slight fluctuations.
5. It is shown that the strengthening at the initial stages of treatment happens because of the flow of dislocation accumulation's processes in flat clusters, the formation of micro-doubles and shear bands with high density of dislocations in them, which provide dispersion of the grain structure and reducing the size of the crystallite more than 10 times.
6. It is revealed that additional factors of strengthening are changes of phase and chemical composition of the surface layer, as well as formation of compression stresses and reorientation of grains in it.
7. The market opportunity evaluation of the startup project "hardening technology development of surface layers of CuZn40Pb1 brass after ultrasonic shock treatment in liquid nitrogen environment" was conducted.
8. The analysis of the workplace parameters, which have a direct impact on human health, life and workflow: microclimate, noise, vibration, electrical safety, fire safety. All set parameters satisfy the requirements of sanitary standards.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сидоренко С.І. Синтез деформаційних нанокompозитів на поверхні алюмінійового сплаву Д16 за допомогою ультразвукового ударного оброблення / С.І.Сидоренко, С.М. Волошко, І.Є. Котенко, А.П. Бурмак // Металлофиз. новейшие технологии. – 2012. – Т34, № 8. – С. 545 – 560.
2. Мовчан В.П. Основи металургії / В.П. Мовчан, М.М. Бережний / – Дніпропетровськ: Пороги, 2001. – 167 с.
3. Масоперенесення при ультразвуковому ударному обробленні пари Al—Fe / М. О. Васильєв, Б. М. Мордюк, С. І. Сидоренко, С. М. Волошко, А. П. Бурмак // Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України – 2015. – Т. 37, №12, С. 1603–1618.
4. Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий / Д.С. Герцрикен, В.Ф. Мазанко, В.М. Тышкевич, В.М. Фальченко // Киев: РИО ИМФ НАНУ – 1999. – 438 с.
5. Ультразвукова ударна обробка поверхні металевих виробів [Електронний ресурс] // Прес-служба НАН України. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.nas.gov.ua/UA/Messages/news/Pages/View.aspx?MessageID=2153>.
6. Хорбенко И.Г. Ультразвуковая обработка материалов / И.Г. Хорбенко, О.В. Абрамов, М.П. Швегла., 1984. – 280 с.
7. Васильев М.А. Нанокристаллизация металлических поверхностей методами интенсивной пластической деформации (обзор) / М.А. Васильев, Г.И. Прокопенко, В.С. Филатова // Успехи физики металлов. – 2004. – Т.5, С. 345 – 399.
8. Патент № UA 68264. Ультразвуковой інструмент для деформаційного зміцнення і релаксаційної обробки металів / Г.І. Прокопенко, О.Ф. Луговський, В.І. Чорний [та інші]. – заявл. 18.12.02; опубл. 15.07.04, Бюл. № 7.

9. Технологія машинобудування для електромеханіків // Ю.І. Чучман – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, – 2001. – 348 с.

10. Бурмак А.П. Формування структурно-фазових станів при ультразвуковому ударному оброблянні та механічні властивості поверхні алюмінієвого 74 сплаву Д16: дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: 05.16.01 “Металознавство та термічна обробка металів” / Андрій Петрович Бурмак. – Київ, 2014. – 191 с.

11. Mordyuk B.N. Fatigue life improvement of  $\alpha$ -titanium by novel ultrasonically assisted technique / B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko // Materials Science and Engineering. – 2006. – № 437. – P. 396 – 405.

12. Патент № 151278182. Спосіб ультразвукової ударної обробки поверхонь деталей та зварних з'єднань/ Ю.Ф. Кудрявцев, А.В. Мовчанюк, О.Ф. Луговський. – МПК В24В 1/04, 1986.

13. Enhanced fatigue behavior of powder metallurgy Ti-6Al-4V alloy by applying ultrasonic impact treatment / A.I. Dekhtyar, B.N. Mordyuk, D.G. Savvakina, V.I. Bondarchuk, I.V. Moiseeva, and N.I. Khripta // Mater. Sci. Eng. A, – 2015. – Vol. 641 – P. 348 – 359.

14. Фізичні основи ультразвукового ударного зміцнення металевих поверхонь / Г.І. Прокопенко, Б.М. Мордюк, М.О. Васильєв, С.М. Волошко // Київ: Наукова думка – 2017.

15. Створення ультразвукового обладнання для зміцнення та релаксаційної обробки зварних конструкцій у вагонобудуванні / В.І. Приходько, М.В. Високолян, В.В. Волочай, Г.І. Прокопенко, Б.М. Мордюк, В.Т. Черепін, Т.А. Красовський, Т.В. Попова // Наука та інновації. – 2014. – Т. 10, № 1. – С. 5 – 17.

16. Mordyuk B.N. Ultrasonic impact treatment – an effective method for nanostructuring the surface layers in metallic materials / B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko // In. M.Aliofkhazraei (Ed.), Handbook of mechanical nanostructuring, Wiley-VCH, Weinheim. – 2015. – P. 417 – 434.

17. Study of the surface nanocrystallization induced by the esonix ultrasonic impact treatment on the near-surface of 2024-T351 aluminum alloy / An X., C.A. Rodopoulos, E.S. Statnikov, V.N. Vitazev, O.V. Korolkov // J. Mater. Eng. Perform. – 2006 – P. 355 – 364.

18. Rodopoulos C.A. The effect of ultrasonic impact treatment on the fatigue resistance of friction stir welded panels / C.A. Rodopolous, S.G. Pantelakis, and M.P. Papadopoulos // J. Mater. Eng. Perform. – 2009. – Vol. 18. – P. 1248 – 1257.

19. Повышение сопротивления усталости и коррозионной стойкости сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой и электроискровым легированием / Г. И. Прокопенко, Б. Н. Мордюк, В. В. Кныш, С. А. Соловей, Т. В. Попова // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 3. – С. 34 – 40.

20. Васильев М.А. Механохимическое окисление поверхности металлических сплавов под действием интенсивной пластической деформации / М. А. Васильев, С. М. Волошко, Л. Ф. Яценко // Успехи физики металлов. – 2014. – Т. 15, № 2. – С. 79-100.

21. Ультразвукова ударна обробка поверхневого шару титану BT1-0 в субмікросталічному стані / М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, Д.В. Павленко, Л.Ф. Яценко // Металлофізика і новітні технології. – 16.05.2014. – Том 37. – вип. 1.

22. Wang Y.M. Nanocrystalline grain structures developed in commercial purity Cu by low-temperature cold rolling / Y.M. Wang, M.W. Chen, H.W. Sheng, and Ma E. // J.Mater. Res. – 2002. №17. – P. 3004.

23. Li Y.S. Microstructural evolution and nanostructure formation in copper during dynamic plastic deformation at cryogenic temperatures // Y.S. Li, N.R. Tao, and K. Lu // Acta Mater. – 2008. – Vol. 56. – P. 230 – 241.

24. High density nano-scale twins in Cu induced by dynamic plastic deformation / W.S. Zhao, N.R. Tao, J.Y. Guo et al. // Scripta Mater. – 2005 №53. – P. 745 – 749.

25. Васильев М.А. Микроструктура и механические свойства металлов и сплавов, деформированных в жидком азоте (обзор) / М.А. Васильев, С.М. Волошко, Л.Ф. Яценко // Успехи физики металлов. – 2012. – Т.13, №3. – С. 303 – 343.

26. Effect of cryo-rolling and annealing on microstructure and properties of commercially pure aluminium / N. Rangaraju, T. Raghuram, B. Vamsi Krishna et al., // Mater. Sci. Eng. – 2005. – Vol.398, №1 – 2. – P. 246 – 251.

27. Патент № 11416. Пристрій для зміцнення зовнішніх циліндричних поверхонь деталей/ Ю.І. Бабей, Т.М. Калічак, В.І. Кирилів. – МПК: B24B 39/00, 1996.

28. Мильман Ю.В. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования / Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (98). – 2011. – №4. – С. 182–187.

29. Горелик С.С. Рентгенографический и электронно–оптический анализ: [учеб. пособие для вузов.] / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. – М.: МИСИС, 1994. – 328 с.

30. Миркин Л. И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов [Текст] / Л.И. Миркин. – М. : Машиностроение, 1979. – 134 с.

31. Никитин Ю.А. Возможности применения метода непрерывного вдавливания для оценки прочностных свойств алюмоаэросилогелей / Ю.А. Никитин, К.Н. Хоменко, В.В. Брей. // Институт химии поверхности НАН Украины. – 2001. – №7. – С. 50–54.

32. Softening and hardening of ECAP nickel under ultrasonic treatment / A.P. Zhilyaev, A.A. Samigullina, A.E. Medvedeva, S.N. Sergeev // Materials Science and Engineering. – 20 June 2017. – Vol. 698. – P 136 – 142.

33. Schroeder T.A. The formation of martensite and the mechanism of the shape memory effect in single crystals of Cu-Zn alloys / T.A. Schroeder and C.M. Wayman // Acta Metallurgica. –1977. – Vol. 25, №12. – P. 1375 – 1391.

34. Ahlers M. Martensite and equilibrium phases in Cu-Zn and Cu-Zn-Al alloys / M. Ahlers. // Progress Mater. Sci. – 1986. – Vol. 30, №3. – P. 135–186.

35. Sagaradze V.V. The structure and properties of Fe–Ni alloys with a nanocrystalline austenite formed under different conditions of  $\gamma$ – $\alpha$ – $\gamma$  transformations / V.V. Sagaradze, V.E. Danilchenko, Ph L'Heritier, V.A. Shabashov // Materials Science and Engineering: A. – 2002. – Vol.337, №1. – P. 146–159.

36. Bondar V.I. Structure fragmentation in Fe-based alloys by means of cyclic martensitic transformations of different types / V.I. Bodnar, V.I. Danilchenko, I.M. Dzevin // Nanoscale Res. Lett. – 2014. – Vol. 9 – P. 92.

37. Xiao G.H Microstructures and mechanical properties of a Cu–Zn alloy subjected to cryogenic dynamic plastic deformation / G.H. Xiao, N.R. Tao, and K. Lu // Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Vol. 513–514 – P. 13 –21.

38. Майборода М. М. Структурно – фазовий стан та мікротвердість поверхні латуні ЛС59-1 за умов ультразвукової ударної обробки в різних атмосферах: Магістерська дисертація / М.М. Майборода // Київ, 2018. – 82 с.

39. Угрин К. О. Фізико-хімічний стан та мікротвердість поверхні латуні ЛС59-1 після ультразвукової ударної обробки в рідкому азоті : Бакалаврський диплом / К.О. Угрин // Київ, 2018. – 59 с.

40. Особливості формування структурно-фазового стану поверхневих шарів стопу Д16 внаслідок ультразвукового ударного оброблення залізним бойком в різних середовищах / М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, А.П. Бурмак // Металлофиз. новейш. технол. – 2017. – Т. 39, №1. С. 49 – 68.

41. Еволюція структурно-фазового стану та мікротвердості поверхні неіржавійної сталі 12Х18Н10Т за умов ультразвукового ударного оброблення в різних середовищах / М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, А.П. Бурмак, Н.В. Франчік // Металлофиз. новейшие технолог. – 2017. – Т. 39. №7. – С. 905 – 928.

42. Vasylyev M.A. Influence of microstructural features and deformation-induced martensite on hardening of stainless steel by cryogenic ultrasonic impact



treatment / M.A. Vasylyev, B.N. Mordyuk, S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko, A.P. Burmak // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 343. – P. 57–68.

43. Игнатович С.Р. Универсальный микро/нано- индентометр «Микрон-гамма» / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев // *Заводская лаборатория*. – 2011. – Т. 77, № 1. – С. 61 – 67.

44. Степанов Ю.Н. Расчет модуля Юнга нанокристаллических металлических образцов / Ю.Н. Степанов, М.И. Алымов // *Металлы*. – 2004. – № 3. – С. 65 – 69.

45. Vasylyev M.A. Nitridation of Ti6Al4V alloy under ultrasonic impact treatment in liquid nitrogen / M.A. Vasylyev, S.P. Chenakin, and L.F. Yatsenko // *Acta Mater.* – 2012. – Vol. 60 – P. 6223 – 6233.

46. Vasylyev M.A. Ultrasonic impact treatment induced oxidation of Ti6Al4V alloy / M.A. Vasylyev, S.P. Chenakin, and L.F. Yatsenko // *Acta Mater.* – 2016. – Vol. 103 – P. 761 – 774.

47. Vasylyev M.A. Corrosion of 2024 alloy after ultrasonic impact cladding with iron / M.A. Vasylyev, B.N. Mordyuk, S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko and A.P. Burmak // *Surface Engineering*. – 2018. – № 34:4. – P. 324–329.

48. Mordyuk B.N Structurally induced enhancement in corrosion resistance of Zr – 2.5% Nb alloy in saline solution by applying ultrasonic impact peening / B.N. Mordyuk, O.P. Karasevskaya, and G.I. Prokopenko // *Mater. Sci. Eng. A* – 2013. – Vol. 559 – P. 453 – 461.

49. Khripta N.I. Surface Layers of Zr-18%Nb Alloy Modified by Ultrasonic Impact Treatment: Microstructure, Hardness and Corrosion / N.I. Khripta, O.P. Karasevskaya, and B.N. Mordyuk, // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2017. – Vol. 26, №11. – P. 5446–5455.

50. Moshkovich A. Friction, wear and plastic deformation of Cu and  $\alpha/\beta$  brass under lubrication conditions / A. Moshkovich, V. Perfilyev, I. Lapsker, and L. Rapoport // *Wear* – 2014. – Vol. 320 – P. 34.

51. Mechanical Properties, Phase and Chemical Compositions of a Surface of the Ti–6Al–4V Alloy After Ultrasonic Impact Treatment in Chemically Active and Neutral Mediums / М.О. Васильев, Б.М. Мордюк, Г.И. Прокопенко,

С.М. Волошко, Л.Ф. Яценко, Н.І. Хріпта // *Металлофиз. новейшие технол.* – 2018. – Vol. 40, № 8. – P 1029 – 1049.

52. Grain structure evolution during cryogenic rolling of alpha brass / T. Konkova, S. Mironov, A.V. Korznikov, G. Korznikova, M.M. Myshlyayev, and S.L. Semiatin // *J. Alloys Compounds* – 2015. – Vol. 629 – P. 140 – 147.

53. A two-step approach for producing an ultrafine-grain structure in Cu-30Zn brass / T. Konkova, S. Mironov, A.V. Korznikov, G. Korznikova, M.M. Myshlyayev, S.L. Semiatin // *Mater. Letter.* – 2015. – Vol. 161 – P. 1-4.

54. An EBSD investigation of cryogenically-rolled Cu–30%Zn brass / T. Konkova, S. Mironov, A.V. Korznikov, G. Korznikova, M.M. Myshlyayev, S.L. Semiatin // *Mater. Character.* – 2015. – Vol. 101 – P. 173 – 179.

55. ДСанПіН 3.3.2-007-98 – Організація і обладнання робочих місць.

56. ДСН 3.3.6.042-99 – Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

57. ГОСТ 12.1.005-88 – Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

58. Розділ з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях у магістерських дисертаціях: Рекомендації до виконання [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 132 «Матеріалознавство» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О.Г. Левченко // Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, – 2019. – 24 с.

59. ДСН 3.3.6.037-99 – Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

60. ГОСТ 12.1.012-2004. ССБТ "Вібраційна безпека. Загальні вимоги".

61. ДНАОП 0.00-1.32-01 – Правила побудови та розміщення електроустановок.

62. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний, [та ін.]. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. — К.: Основа, 2006 — 448 с.

63. ГОСТ 12.1.009-76 – Система стандартов безопасности труда.

Электробезопасность.

64. НПАОП 0.00-7.15-18 – Виробничі приміщення, організації і обладнання робочих місць.

65. НПАОП 0.00-1.28-10 – Правила охорони праці під час експлуатації ЕОМ.

66. Серіков Я.О. Основи охорони праці: Навчальний посібник для студентів вищих закладів освіти / Я.О. Серіков. – Харків, ХНАМГ, 2007. – 227с.

67. Москальова В.М. Охорона праці: Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення / В.М. Москальова. – Рівне: НУВГП, 2009.

68. Кодекс цивільного захисту України, затверджений Верховною Радою України від 02.10.2012р. № 5403-V.

69. Гавриш О.А. Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / О.А. Гавриш // Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

70. Гавриш О.А. Методичні рекомендації до розробки економічної частини дипломних проектів і робіт / О.А. Гавриш, В.І. Кривда, С.В. Нараєвський. – К.: ІВЦ “Політехніка”. – 2010. – 54 с.